

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky



Zařízení pro udržování konstantního tlaku vzduchu na výstupu
z kompresoru při využití jeho kompresního tepla pro výrobu elektřiny

Device for Providing of Constant Air Pressure at the Compressor
Outlet by Using its Compression Heat to Produce Electricity

Student:

Bc. Lukáš Šubrt

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Ladislav Vilimec

Ostrava 2018

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Lukáš Šubrt**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení

Téma: Zařízení pro udržování konstantního tlaku vzduchu na výstupu
z kompresoru při využití jeho kompresního tepla pro výrobu elektřiny
Device for Providing of Constant Air Pressure at the Compressor Outlet
by Using its Compression Heat to Produce Electricity

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Navrhněte způsob a zařízení umožňující využití kompresního tepla při akumulaci elektřiny v systému EC CAES.

Rozsah práce:

1. Vypracujte rešerši pro akumulaci elektřiny.
2. Na schématu EC CAES popište princip jeho funkce a vysvětlete úlohu zařízení pro udržování konstantního tlaku.
3. Definujte požadavky a parametry na tlakovou redukci.
4. Vypracujte analytický model redukce.
5. Analyzujte provoz tlakové redukce i pro jiný čas nabíjení než jednu hodinu.
6. Vypracujte P/I schéma redukce a popište způsob řízení celého souboru akumulace.

Seznam doporučené odborné literatury:

PV 2017-185 Zařízení pro využití kompresního tepla.

Firemní literatura Fy ORGREZ.

Kadrnožka, J.: Lopatkové stroje. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno. ISBN 80-7204-297-1.

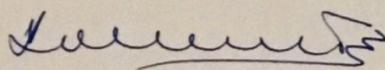
Liška, A.; Novák, P.: Kompresory. Skripta ČVUT Praha, 1999.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

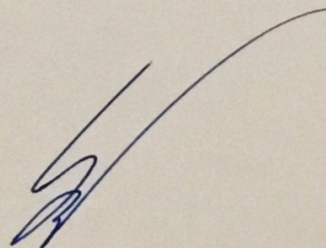
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ladislav Vilímeček**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018



doc. Ing. Kamil Kolarčík, CSc.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 18. 5. 2018
podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, же Высoкá škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, же odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 16. 5. 2018
podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Lukáš Šubrt

Adresa trvalého bydliště:

Příční 393/13, Svatobořice-Mistřín

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

ŠUBRT, L. Zařízení pro udržování konstantního tlaku vzduchu na výstupu z kompresoru při využití jeho kompresního tepla pro výrobu elektřiny. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2018, 68 s, Vedoucí práce: doc. Ing. Ladislav Vilimec

Diplomová práce se zabývá vypracováním analytického modelu zařízení pro udržování konstantního tlaku vzduchu na výstupu z kompresoru při využití jeho kompresního tepla pro výrobu elektřiny. V úvodní části se nachází rešerše na téma akumulace energie. V praktické části je vypracován analytický model zařízení pro udržování konstantního tlaku, který je sestaven na dobu nabíjení jedné hodiny. Dále je zde zpracována analýza zařízení pro udržování konstantního tlaku na jiný provoz, než jedna hodina. V závěru praktické části je popsána regulace a provoz zařízení pro udržování konstantního tlaku.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

ŠUBRT, L. Device for providing of constant air pressure at the compressor outlet by using its compression heat to produce electricity. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Engineering, Department of Energetics, 2018, 68 pages, Supervisor: doc. Ing. Ladislav Vilimec

The thesis deals with the draft of an analytic model of a device for providing of constant air pressure at the compressor outlet by using its compression heat to produce electricity. The introduction offers a description of a research on the topic of energy accumulation. The practical part deals with an analytic model of a device for providing of constant air pressure with regard to one hour of charging. In addition, an analysis of a device for providing of constant air pressure for different running than one hour is presented. The final part discusses the regulation and operation of the device for providing of constant air pressure.

Obsah

Seznam použitých symbolů

Seznam použitých zkratk

Seznam obrázků

Seznam tabulek

1.	Úvod	1
2.	Akumulace energie	3
2.1	Rozdělení akumulátorů elektrické energie	4
2.2	Využití akumulace energie	5
2.3	Technologie akumulace energie	6
2.3.1	Elektrochemické akumulátory	8
2.3.2	Mechanická akumulace elektřiny	10
2.3.3	CAES systémy	11
3.	Popis zařízení	14
3.1	Popis funkce zařízení	15
3.2	Akumulace elektřiny - výroba tlakového vzduchu	16
3.3	Provoz a redukce tlaku vzduchu před vzduchovým akumulátorem (A1)	17
3.4	Provoz a regulace horkovodního akumulátoru (A2)	18
4.	Návrh zařízení pro udržování konstantního tlaku	21
4.1	Zadané hodnoty	24
4.2	Výpočet nasávaného množství vzduchu (m)	25
4.3	Analytický model nabíjecího kompresoru	26
4.4	Analytický model turbíny u turbodmychadla	32
4.5	Analytický model dmychadla u turbodmychadla	37
4.6	Provoz tlakového zařízení pro jiný čas	48
4.7	Řízení a regulace celého zařízení akumulace	51
5.	Závěr	53
6.	Seznam použité literatury	56
7.	Seznam příloh	57

Seznam použitých symbolů

<u>Symbol</u>	<u>Název</u>	<u>Jednotka</u>
i_{id}	Entropie ideální	kJ/kg
i_{sk}	Entropie skutečná	kJ/kg
m	Nasávané/dopravované množství vzduchu	kg/s
m_d	Nasávané/dopravované množství vzduchu dmychadlem	kg/s
p	Tlak vzduchu	bar
p_{ref}	Tlak vzduchu referenční	bar
$P_{př}$	Příkon	kJ/s, kW
P_v	Výkon	kJ/s, kW
r	Měrná plynová konstanta	$\text{J/(kg}^{\circ}\text{K)}$
s_{id}	Entropie ideální	$\text{kJ/(kg}^{\circ}\text{K)}$
s_{sk}	Entropie skutečná	$\text{kJ/(kg}^{\circ}\text{K)}$
t	Teplota vzduchu	$^{\circ}\text{C}$
t_{ref}	Teplota vzduchu referenční	$^{\circ}\text{C}$
V	Objem vzduchového akumulátoru	m^3
w	Měrná vlhkost vzduchu	$\%$
w_{ref}	Měrná vlhkost vzduchu referenční	$\%$
η	Účinnost	$\%$

<u>Dolní indexy</u>	<u>Název</u>
1 až 6	Umístnění hodnoty
cel.	Celkově
d	Dmychadlo
final	Konec
id	Ideální
krok	krok
př	příkon
ref	Referenční
sk	Skutečný
start	Začátek
t	Turbína
u	Úsek
v	Výkon

Seznam použitých zkratek

<u>Zkratka</u>	<u>Název</u>
A	Signalizace
A1	Vzduchový akumulátor
A2	Horkovodní akumulátor
ADELE	Adiabater Druckluftspeicher für die Elektrizitätsversorgung
A-CAES	Adiabate Compressed Air Energy Storage
AA-CAES	Advanced Adiabate Compressed Air Energy Storage
C	Regulace
CAES	Compressed Air Energy Storage
Cd	Kadmium
CO ₂	Oxid uhličitý
Č	Čerpadlo
D-CAES	Diabatic Compressed Air Energy Storage
EC-CAES	Energy Central Compressed Air Energy Storage
Ex	Expandér
ExN	Expanzní nádrž
F	Průtok, množství, objem
ChK	Chladič kompresoru (výměník)
I	Indikace
KČ	Kondenzátorové čerpadlo
KGJ	Kogenerační jednotka
Ko	Kondenzátor
Li-on	Lithium-ionová akumulátor
M	Motor
Na-S	Sodíkovo-sírový akumulátor
Ni-Cd	Nikl-kadmiový akumulátor
NK	Nádrž kondenzátu
NiO(OH)	Oxid nikelnatý
P	Tlak
PaT	Parní turbína
Pb	Olovo
Př	Přehřívák páry
Pž	Tlak žádaný
PVE	Přečerpávací vodní elektrárny
R	Archivace, zápis

<u>Zkratka</u>	<u>Název</u>
<i>TR</i>	<i>Točivá redukce</i>
<i>T</i>	<i>Teplota</i>
<i>Tž</i>	<i>Teplota žádaná</i>
<i>V</i>	<i>Ventil</i>
<i>ZV</i>	<i>Zpětný ventil</i>

Seznam obrázků

OBRÁZEK 2.1 - VODNÍ PŘEČERPÁVACÍ ELEKTRÁRNA DLOUHÉ STRÁNĚ	3
OBRÁZEK 2.2 – GRAF ÚČINNOSTI VS. ŽIVOTNOST AKUMULÁTORU	7
OBRÁZEK 2.3 – GRAF NÁKLADŮ NA VÝSTAVBU VS. CENA JEDNOTKY VÝKONU	7
OBRÁZEK 2.4 – SCHÉMA PRŮTOKOVÉ BATERIE	9
OBRÁZEK 2.5 – USPOŘÁDÁNÍ PVE DLOUHÉ STRÁNĚ	10
OBRÁZEK 2.6 – ZJEDNODUŠENÉ SCHÉMA CAES ELEKTRÁRNY	11
OBRÁZEK 2.7 – SCHÉMA PROJEKTU ADELE	13
OBRÁZEK 3.1 – PRINCIP ZAPOJENÍ KOGENERAČNÍHO ZDROJE U ENERGETICKÉ CENTRÁLY S AKUMULACÍ ELEKTŘINY	14
OBRÁZEK 4.1 – SCHÉMA ZAŘÍZENÍ PRO UDRŽOVÁNÍ KONSTANTNÍHO TLAKU VZDUCHU	23
OBRÁZEK 4.2 – SCHÉMA NABÍJECÍHO KOMPRESORU	26
OBRÁZEK 4.3 – I-S DIAGRAM KOMPRESORU	27
OBRÁZEK 4.4 – SCHÉMA TURBÍNY TURBODMYCHADLA	32
OBRÁZEK 4.5 – I-S DIAGRAM TURBÍNY	33
OBRÁZEK 4.6 – GRAF ZÁVISLOSTI TEPLoty NA VÝSTUPU Z TURBÍNY NA TLAKU VZDUCHU VE VZDUCHOVÉM AKUMULÁTORU	36
OBRÁZEK 4.7 – GRAF ZÁVISLOST VÝKONU TURBÍNY NA TLAKU VZDUCHU VE VZDUCHOVÉM AKUMULÁTORU	36
OBRÁZEK 4.8 – SCHÉMA TURBODMYCHADLA	37
OBRÁZEK 4.9 – GRAF DODÁVANÉHO MNOŽSTVÍ VZDUCHU DO VZDUCHOVÉHO AKUMULÁTORU ZA JEDNOTLIVÉ ÚSEKY	44
OBRÁZEK 4.10 – GRAF DODÁVANÉHO MNOŽSTVÍ VZDUCHU DO VZDUCHOVÉHO AKUMULÁTORU O 7% NA ZÁKLADĚ KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ	45
OBRÁZEK 4.11 – GRAF DODÁVANÉHO MNOŽSTVÍ VZDUCHU DO VZDUCHOVÉHO AKUMULÁTORU POMOCÍ REGULACE KOMPRESORU	47

Seznam tabulek

TABULKA 2.1- VYBRANÉ ELEKTROCHEMICKÉ TECHNOLOGIE A JEJICH VLASTNOSTI....	9
TABULKA 4.1 - ZADANÉ HODNOTY	24
TABULKA 4.2 - CHARAKTERISTIKA TURBÍNY V JEDNOTLIVÝCH KROCÍCH	35
TABULKA 4.3 - NASÁVANÉ MNOŽSTVÍ VZDUCHU DMYCHADLEM A VÝSTUPNÍ TEPLOTY Z DMYCHADLA	38
TABULKA 4.4 - DODANÉ MNOŽSTVÍ VZDUCHU DMYCHADLEM DO VZDUCHOVÉHO AKUMULÁTORU.....	43
TABULKA 4.5 - DODÁVANÉ MNOŽSTVÍ VZDUCHU DO VZDUCHOVÉHO AKUMULÁTORU.....	43
TABULKA 4.6 - PŘEPOČÍTANÉ DODÁVANÉ MNOŽSTVÍ VZDUCHU TURBODMYCHADLEM O 7%	45
TABULKA 4.7 - PŘEPOČÍTANÉ DODÁVANÉ MNOŽSTVÍ VZDUCHU TURBODMYCHADLEM O 7%	46
TABULKA 4.8 - PŮVODNÍ DOBA NABÍJENÍ.....	48
TABULKA 4.9 - KRATŠÍ DOBA NABÍJENÍ (30 MINUT)	49
TABULKA 4.10 - DELŠÍ DOBA NABÍJENÍ (120 MINUT).....	50
TABULKA 4.11 - DELŠÍ DOBA NABÍJENÍ (180 MINUT).....	50

1. Úvod

Akumulace elektrické energie je poslední roky významným tématem v energetice, a řešení problémů jak naložit s přebytky vyprodukované elektrické energie. Problematika akumulace energie se týká především obnovitelných zdrojů energie, kde je největším problémem nestálá produkce elektrické energie. Především u větrných a solárních elektráren, které jsou nejrozšířenější. Pokud bychom se bavili o problémech spojených s obnovitelnými zdroji, tak musíme určitě zmínit nerovnoměrný výskyt slunečního svitu a větru. Jejich intenzita kolísá na základě ročního období, denního času, ale také na atmosférických podmínkách. Problémy spojené s výpadky dodávání elektrické energie do sítě, můžeme nalézt také u tradičních zdrojů, jako jsou uhelné, nebo jaderné elektrárny. U uhelných elektráren najíždění zdroje do provozu trvá od pár hodin do jednoho dne, u jaderných elektráren se může jednat o týdny. Nesmírnou výhodou produkce elektrické energie z fosilních paliv je nezávislost na přírodních podmínkách, geografické poloze nebo ročním období. Skladování a distribuce fosilních paliv jsou méně problematické.

S jistotou můžeme dnes říct, že poměr poptávané a vyrobené elektrické energie nebude nikdy v souladu, protože spotřebitelé podléhají mnoha výkyvům. Pro příklad si můžeme uvést takový normální pracovní den. Ráno lidé vstávají do práce, rozsvítí světla v domech, vaří si kávu, pouštějí televizory. V závodech začíná ranní směna, najíždějí se linky a další různé průmyslové stroje s velkými příkony. Zde máme velkou spotřebu elektrické energie během dopoledne. Odpoledne se situace uklidňuje a odběr ze sítě je stabilní až k večerním hodinám. Ve večerních hodinách se rodiny schází doma, rozsvěcují své domy a pouštějí různé domácí spotřebiče. Potřeba elektrické energie opět prudce roste. Po desáté hodině večerní spotřeba opět klesá na minimum, lidé usínají a spotřeba není tak velká, tak vzniká přebytek energie, který se nemá kam umístit. Na příkladu můžeme vidět, že během dne máme energetické špičky a také místa, kde je přebytek energie a nevíme kam s ním. Zdroje jako uhelné a plyné elektrárny, se lehce regulují, ale co takové solární nebo větrné elektrárny? K pokrytí těchto situací musí být přenosová soustava dostatečně naddimenzovaná a vybavena vhodným řídicím systémem. Díky zvyšujícímu se podílu produkce elektrické energie z obnovitelných zdrojů, síť by měla být vybavena tzv. akumulačním systémem, který dokáže uložit elektrickou energii například ze solárních elektráren na večerní špičku.

Princip akumulace energie vychází z toho, že měníme určitou energii na jinou formu energie, kterou umíme efektivně uložit. Pro příklad, můžeme transformovat elektrickou energii na tlakovou energii plynu, který uložíme do plynojemu či podzemní jeskyně a v případě potřeby tlakovou energii změnit zpět na elektrickou. Je mnoho způsobů jak ji přeměnit a uskladnit, avšak jednotlivé technologie akumulace se liší v účinnostech přeměny, životnosti systému, výkonech ve kterých mohou pracovat a finančních nákladů na výstavbu.

Problematikou akumulace energie se musíme zabývat již dnes, abychom v budoucnu, kdy prudce vzroste podíl elektrické energie z obnovitelných zdrojů, byli připraveni a měli technologie akumulace energie na vysoké úrovni a zbytečně nemařili velké množství cenné energie. Díky rozšířené akumulaci energie by se nemusela v takovém množství produkovat elektřina z fosilních paliv. Zasluhou menší produkce elektrické energie z fosilních paliv, by se nevypouštělo tolik spalin do ovzduší a také by klesla těžba (ochrana krajiny).

2. Akumulace energie

Jedná se o proces, který umožňuje uskladnění energie na vhodné místo a ve vhodné formě, aby byla k dispozici pro následovné použití v libovolný čas a v požadovaném množství i kvalitě. Obvykle se akumuluje elektrická energie, ale také je možnost akumulovat teplo. Zařízení pro akumulaci energie nazýváme obecně jako akumulátor. Existuje mnoho způsobů pro akumulaci elektřiny, pokaždé se jedná o transformaci na jinou formu energie, takovou, kterou můžeme efektivně uskladnit, a v případě potřeby znovu přeměnit zpět na elektrickou energii, nebo jinou formu energie (např. tlakovou nebo tepelnou) dle potřeby. Způsoby akumulace se liší zejména v oblastech výkonu, při kterých jednotlivé systémy pracují, dále účinností akumulace, dobou udržení akumulované energie s přijatelnými ztrátami, počtem cyklu, životností akumulátoru atd. [1, 2]

Akumulace energie umožňuje překonat geografické i časové rozdíly mezi výrobou a spotřebou, jak v malém měřítku, tak i ve velkém. Zdroje umožňující akumulaci energie, byly instalovány v minulosti za účelem využití nevyrovnané poptávky po energiích. Nynější zvýšený důraz na ekologizaci energetického sektoru poukazuje na častější využití těchto technologií pro vyšší účinnost procesů (pro příklad si můžeme uvést využívání odpadního tepla prostřednictvím tepelné akumulace). S rostoucím počtem fotovoltaických a větrných elektráren bude poptávka po těchto zařízeních čím dál vyšší. V České republice je nejznámější projekt spojený s akumulací energie přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé stráně viz. obrázek 2.1. [3,4]



Obrázek 2.1 - vodní přečerpávací elektrárna Dlouhé stráně [5]

2.1 Rozdělení akumulátorů elektrické energie

K akumulaci elektrické je využíváno několik základních druhů akumulátorů, jenž můžeme rozlišit tím, na který typ energie je elektrická energie přeměněna:

Elektrochemická akumulace - Následující způsob energetické akumulace za pomoci akumulátorových baterií patří mezi nejrozšířenější akumulaci energie, vyznačuje se velkou účinností, relativně malými nároky na zastavěný prostor a okamžitou pohotovostí. Do chemických akumulátorů patří průtokové baterie a elektrické články. [3]

Elektrická akumulace - Akumulace probíhá za pomoci elektrických součástí nazývaných kondenzátory (kapacity). U kondenzátorů jako jediného typu akumulátoru je elektrická energie uchována v podobě elektrického náboje, proto se jedná o přímou akumulaci. [3]

Pneumatická akumulace - Využívá se pro skladování elektrické energie ve formě stlačeného vzduchu, který se uskládá v zásobníku (např. vzduchovou nádobu, šachtu či jeskyni v podzemí). Nabíjecí kompresor, který je poháněn elektromotorem, jenž je napájen z elektrické sítě, dopravuje stlačený vzduch do zásobníku. Při úbytku zatížení se síť zatěžuje chodem nabíjecího kompresoru a elektrická energie se ukládá ve formě stlačeného vzduchu. Při špičkové zátěži sítě se stlačený vzduch vhání na plynovou turbínu, která je připojena na generátor a tím se vyrábí elektrická energie. [3]

Hydraulická akumulace - Jedná se o technologii akumulace (např. přečerpávací vodní elektrárna), která umožňuje skladovat obrovské množství přebytečné elektrické energie ze sítě a v případě potřeby je schopná během okamžiku ji opět dodat do sítě dle potřeby. V těchto zařízeních se elektrická energie přeměňuje na potenciální energii vody, která je vyvýšena vůči směru gravitačního působení, díky tomu se zvětšuje potenciální energie. [3]

Akumulace kinetickou energií - Akumulace elektrické energie pomocí kinetiky je zajištěna díky setrvačnickům. Kinetická energie rotujícího tělesa je úměrná hmotnosti (momentu setrvačnosti) a druhé mocnině otáček. Díky vysokým otáčkám má i zdánlivě lehký setrvačnický vysokou energii. Běžné nízkootáčkové setrvačníky mají ocelový rotor s otáčky do 7 000 ot./min. Vysokootáčkové setrvačníky jsou z pevných kompozitních materiálů a dotahují otáček do 100 000 ot./min. Pro snížení tření rotoru se rotor točí ve vakuu a je magneticky nadnášen. Součástí rotoru jsou permanentní magnety, které dopomáhají roztáčení, nebo při brzdění generují proud v cívkách. Jako místo aplikace

si můžeme uvést vesmír, kde slouží setrvačníky nejen jako akumulace energie ze slunečních kolektorů, ale také jako prostorová stabilizace těles v beztlákovém stavu. [6]

Akumulace supravodičů - Akumulace je uskutečňována díky supravodivým cívkám, které se podchlazují na velmi nízké teploty, jenž se pohybují kolem 4 K. Díky velmi nízké teplotě ve vodiči prakticky zaniká elektrický odpor, díky tomu elektrický proud ve vodiči obíhá dlouhou dobu po jeho odpojení od zdroje. Supravodivé materiály se vyznačují významnými schopnostmi, jako vysokou hustotou energie (řádově v MWh/m³) a také prakticky se dají neomezeně rychle nabíjet i vybíjet. Technologie výroby supravodičů má ovšem jeden velký zásadní problém a to, že supravodič může svou supravodivost v určitém místě neočekávaně a naprosto ztratit v důsledku kvantových jevů, díky zásahu vysokoenergetických částic z radioaktivního rozpadu, nebo kosmického záření. Ztráta supravodivosti probíhá ve velmi malém objemu, nýbrž díky silnému proudu procházejícímu vodičem se začne v daném místě ihned ohřívat, čímž se ztráta rychle rozšíří. Tento efekt je velmi nepříjemný, protože veškerá uskladněná energie se v krátké době uvolní. [7]

2.2 Využití akumulace energie

Akumulaci energie můžeme najít napříč celým energetickým sektorem od soustav centrálního zásobování chladem a teplem přes elektrizační soustavy po autonomní (off-grid) aplikace. Kategorie, kde a jak může být využita akumulace energie, jsou následovné:

Sezónní uskladnění - Zde se využívá možnost uskladnění energie na dny, týdny nebo měsíce za účelem vyrovnaní přerušovaných dodávek energie (odlehle lidské obydlí v zimě, kde by mohl být problém se zásobováním energie) nebo také kvůli proměnlivé dodávce a spotřebě daného druhu energie z hlediska dlouhodobého (např. uskladňování tepla do podzemního zásobníku v letním období a následné jeho využívání v zimě). [4]

Obchodování s uskladněnou energií - Akumulace spočívá v tom, že v době nízké poptávky se levná energie uskladní, a počká se na následné období vysoké poptávky (vyšší cena za energii). Taková akumulace probíhá zpravidla na denní bázi. [4]

Regulace frekvence - Jedná se o automatické vyrovnaní bilance spotřeby elektrické energie a výroby se záměrem udržení frekvence v určitém pásmu. [4]

Regulace napětí - Slouží k automatické injekci nebo absorpci jalového výkonu z nebo do distribuční a přenosové soustavy za cílem udržení požadované velikosti napětí. [4]

Start ze tmy - V případě selhání veškerých bezpečnostních a podpůrných mechanismů, přichází zpravidla tzv. blackout (výpadek elektřiny), akumulace v tomto případě zajišťuje schopnost startu ze tmy, najetí bloku a docílení napětí, možnosti připojení k síti bez podpory externího zdroje. [4]

Snížení zátěže přenosové soustavy a přesun spotřeby - Změna času, kdy probíhá určitá aktivita (např. ohřev vody nebo vytápění). [4]

Kombinovaná výroba tepla a elektřiny - Uskladnění tepelné a elektrické energie za účelem překonání časového rozdílu mezi výrobou a spotřebou tepla a elektřiny. [4]

Integrace intermitentních zdrojů energie - Využívání akumulace energie ke změně a optimalizaci výkonu intermitentních zdrojů (např. vítr, slunce, přílivy), překonání náhlých a sezónních změn výkonu, spotřeby energie a řízení bilance výroby. [4]

Spotřeba nepřipojená k soustavě (off-grid) - Spotřebitelé, kteří nejsou připojeni k soustavě a mají svůj fosilní nebo intermitentní obnovitelný zdroj k zisku tepelné nebo elektrické energie. Zde akumulace zajišťuje ekonomickou a nepřetržitou dodávku energie. [4]

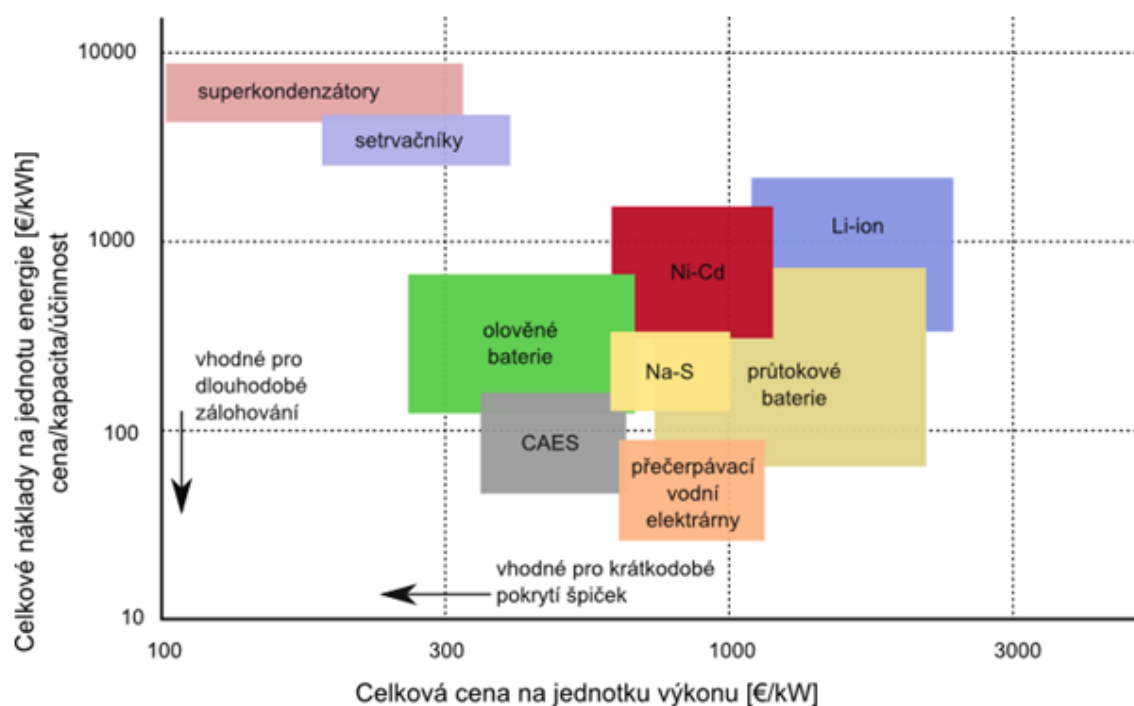
Využití odpadního tepla - Využíváme zde technologie z akumulace energie pro časové a geografické oddělení tepelné výroby (např. kondenzační elektrárny, kogenerační elektrárny) a spotřeby (např. centrální zásobování teplem). [4]

2.3 Technologie akumulace energie

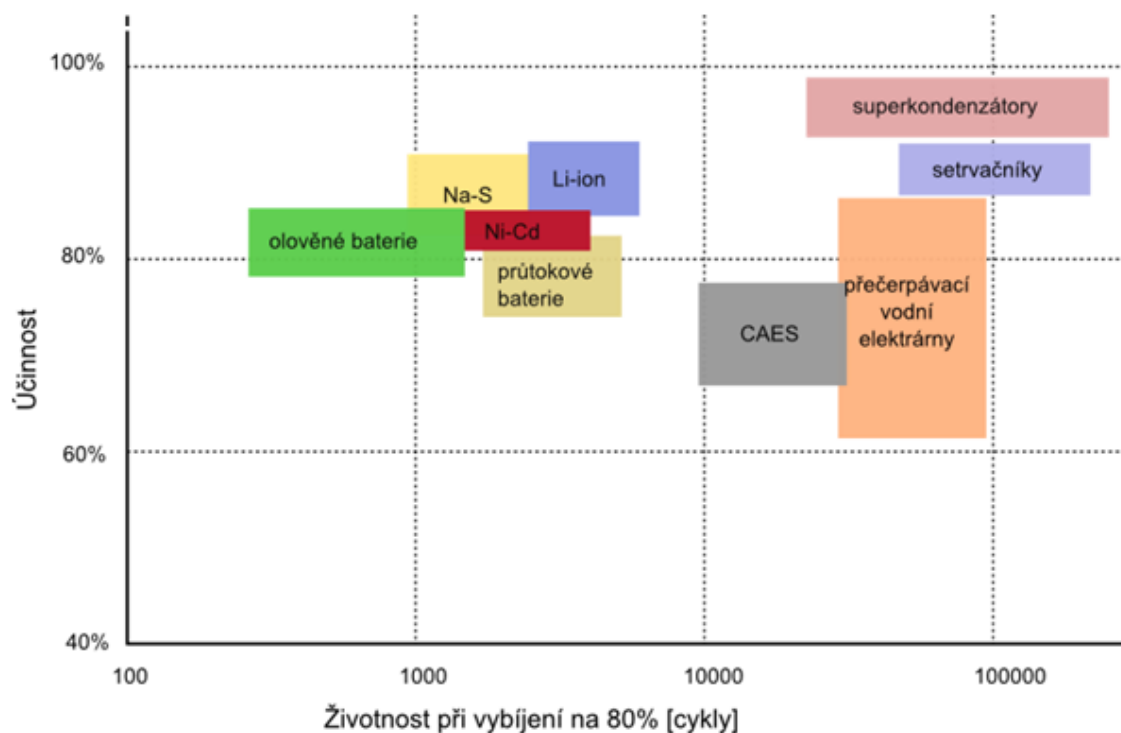
Možnosti využití a rozdělení akumulace v různých oblastech jsme si uvedli ve dvou předchozích kapitolách, poslední a nejdůležitější rozdělení akumulace podle technologie si uvedeme zde, technologie můžeme ještě rozdělit na podskupiny:

- Elektrochemická akumulace (baterie, superkapacitory, průtokové baterie..)
- Mechanická akumulace (PVE, CAES, setrvačníky..)

Porovnání vlastností můžeme vidět na obrázcích 2.2 a 2.3, kde na obrázku 2.2 sledujeme graf porovnání celkových nákladů na akumulaci v eurech. Na obrázku 2.3 můžeme vidět graf porovnání mezi účinností a životností. [8]



Obrázek 2.2 – graf nákladů na výstavbu vs. cena jednotky výkonu [8]



Obrázek 2.3 – graf účinnosti vs. životnost akumulátoru [8]

2.3.1 Elektrochemické akumulátory

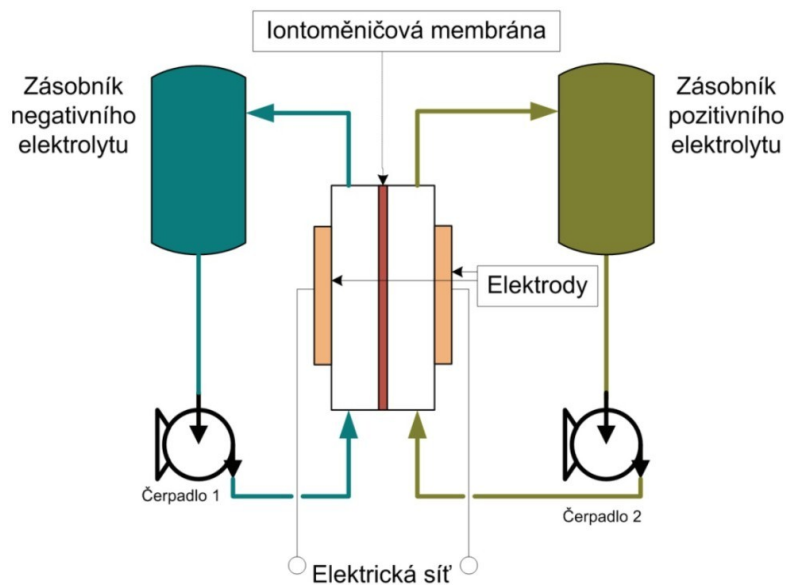
Uschovávání energie zde je postaveno na principu chemických vazeb elektrodového materiálu, kdy dochází k vratným reakcím pomocí elektrodového materiálu s ionty z elektrolytu. Do skupiny elektrochemických akumulátorů patří veškeré akumulátory, ale také sem patří např. superkondenzátory, které jsou postavené spíše na principu fyzikálním. [8]

Pb akumulátory - Olovněné akumulátory spolu s niklkadmiovými mezi nejstarší a také nejrozšířenější akumulátory. I když v některých oblastech jsou na vzestupu akumulátory Li-iontové, ale nalezneme oblasti, kde jsou olovněné a alkalické baterie nenahraditelné a to především díky svým vlastnostem jako rezistence vůči nízké teplotě, nebo bezpečnosti a ceně. Nevýhodou akumulátorů je však jejich ekologická zátěž v podobě Pb a Cd. [8]

Ni-Cd akumulátory - Kladná elektroda alkalického akumulátoru je v nabitém stavu tvořena oxo-hydroxidem nikelnatým NiO(OH) , jenž při vybíjení se mění na hydroxid nikelnatý. Elektrolytem je zde rozpuštěný hydroxid draselný ve vodě. Jeden článek má napětí 1,2 V. Ni-Cd baterie využíváme pro krátkodobou zálohu. Akumulátory se vyznačují svými vlastnostmi jako odolnost vůči rázům, vibracím, extrémním podmínkám a teplotám. [8]

Li-ion akumulátory - Tento typ akumulátorů je oproti olovněným mnohem lehčí. Mají relativně velkou hustotu energie i vysokou účinnost. Také výhodou je, že tolik nezatěžují životní prostředí neobsahují kadmium, rtuť ani olovo. Mezi nevýhody můžeme zařadit jejich snižující se životnost při opakovaném vybíjení a vyšší pořizovací cenu. U velkokapacitních baterií představují nebezpečí výbuchu a požáru. Nesmíme zapomenout na jejich největší výhodu a tou je hmotnost, díky ní je to nejvhodnější přenosný akumulátor (elektromobily, mobily, atd.). [8]

Průtokové baterie - Jedná se o nekonvenční baterie. Průtokové, nebo regenerativní baterie se jako běžné baterie skládají ze záporné a kladné elektrody a elektrolytu. Ten je však rozdělen do dvou nádob, kde v jedné je kladný elektrolyt a ve druhé se nachází záporný elektrolyt. Výhodou průtokové baterie je, že elektrolyt nemá degradační vlastnosti, tedy odpadá problém s omezeným počtem nabíjecích cyklů. Konstrukce baterie je navržena na 30 až 50 let, nachází se zde čerpadla, která vhání elektrolyty do reaktorů, kde se přes iontoměničovou membránu tvoří chemická reakce viz obrázek 2.4. Membrána má životnost zhruba 15 000 cyklů. [9]



Obrázek 2.4 – schéma průtokové baterie [9]

Jedna z nevýhod průtokové baterie je, že má malou hustotu energie 15 až 25 kWh/m³ jen, pro porovnání Li-ion baterie má 300 kWh/m³. Průtokové baterie lze využívat jako záložní zdroj energie, má velice rychle nabití na plný výkon. [9]

Superkondenzátory - Jedná se elektrochemické součástky, které dokážou akumulovat, vydat a udržet velké množství elektrické energie za využití technologie vratné chemické reakce. Jedná se o mezník mezi klasickými bateriemi a kondenzátory. Elektrody superkondenzátorů jsou vyrobeny z materiálů, které vynikají vysokou plošnou hustotou, tepelnou a chemickou stabilitou, dobrou elektrickou vodivostí, netoxičností a vysokou kapacitou. [8]

Tabulka 2.1- vybrané elektrochemické technologie a jejich vlastnosti [8]

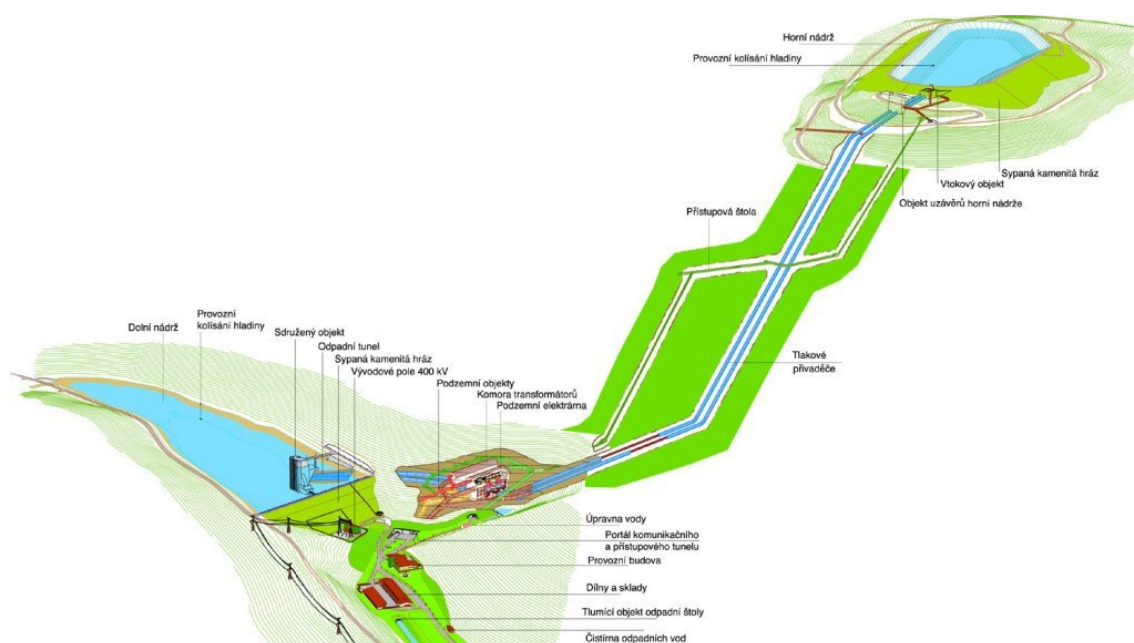
Akumulátory	Výhody	Nevýhody
Pb	Cena, hustota energie, výkon	Ekologie, účinnost
Ni-Cd	Hustota energie, výkon, účinnost	Ekologie
Li-ion	Hustota energie, výkon, účinnost	Cena, bezpečnost
Průtokové baterie	Velká kapacita, nízké náklady	Nízká hustota energie
Superkondenzátory	Výkon, účinnost, životnost	Nízká hustota energie, samovybíjení

2.3.2 Mechanická akumulace elektřiny

Energie se nemusí uschovávat pouze jen v chemických vazbách, ale pro určité použití je velmi vhodná pro přeměnu na kinematickou, nebo potenciální energii. [8]

Setrvačníky - Energie se ukládá pomocí energie do otáčející se hmoty rotoru. Podle otáček rotoru se rozlišují setrvačníky na nízkootáčkové a vysokootáčkové. Množství energie E_k tímto způsobem uložené je úměrné momentu setrvačnosti J a čtverci jeho úhlové rychlosti ω . Nízkootáčkové setrvačníky mají rotory z oceli a pohybují se 10 000 otáčkami za minutu. Zato vysokootáčkové setrvačníky mají rotory z plastů a jsou vyztuženy vlákny, jejich rychlosti se pohybují nad 100 000 otáčkami za minutu. Vyznačují se vysokým výkonem, nízkou energií a velmi krátkým časem na rozběh v řádech milisekund. [8]

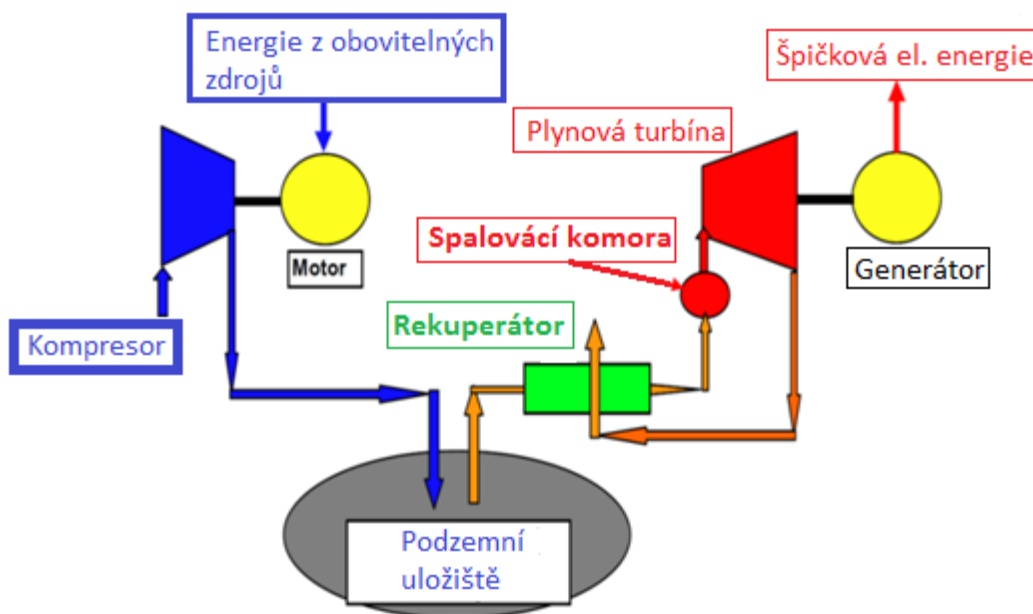
Přečerpávací vodní elektrárny - Jde o nejčastější technologii akumulace pro obrovské množství elektrické energie ze sítě. Základem PVE jsou dvě vodní nádrže propojené tlakovým potrubím viz obrázek 2.5. Princip získávání elektrické energie je takový, že voda pohání svou energií Francoisovu turbínu, která pohání generátor. Ten přeměňuje elektromagnetickou indukci na elektrickou energii. Soustrojí se skládá z turbíny a generátoru to tvoří turbogenerátor. PVE pracuje následovně. Pokud je v síti přebytek elektrické energie, čerpá se voda do horní nádrže ze spodní. V případě opačném je voda vypuštěna z horní nádrže do spodní přes turbínu, jenž vyrábí elektrickou energii. Celková účinnost těchto elektráren se pohybuje okolo 75%. [10]



Obrázek 2.5 – uspořádání PVE Dlouhé stráně [10]

2.3.3 CAES systémy

Technologie CAES (Compressed Air Energy Storage) je mechanická akumulace, kde je elektrická energie akumulována skrze stlačený vzduch do zásobníku. V době, kdy je v síti přebytek elektrické energie se tlakový vzduch shromažďuje do zásobníku, díky vícestupňovému kompresoru při tlaku mezi 5 až 7,5 MPa v případě potřeby dodávky elektrické energie do sítě se vypouští přes turbogenerátor a vyrábí se elektrická energie. [11]



Obrázek 2.6 – zjednodušené schéma CAES elektrárny [11]

Akumulace CAES je využívání stačeného vzduchu jako spalovacího vzduchu pro plynovou turbínu, která je součástí většího energetického celku, nebo kogenerační jednotky. Takto můžeme systém CAES využívat jako decentralizovaný zdroj s výkonem o desítkách MW. Technologie CAES se dnes již provozuje u akumulačních elektráren o výkonech 100 až 300 MW a dobou akumulace v rozsahu hodin až desítek hodin. Vývoj technologií CAES se hlavně míří na zvýšení účinnosti akumulace. [11]

Technologii CAES můžeme rozdělit následně:

- Diabatická (D-CAES)
- Adiabatická (A-CAES)
- Isotermická (I-CAES)

Diabatická (D-CAES) - Akumulovaný vzduch je stlačován do podzemních zásobníků, může se jednat o bývalá ropná ložiska, vyschlé akvifery, podzemní jeskyně atd., které se nacházejí stovky metrů podzemí. Vzduch je stlačován až na 100 bar, tlak je závislý na hloubce umístěného zásobníku. Při potřebě výroby špičkové elektrické energie se vzduch odebírá ze zásobníků a používá se jako spalovací vzduch pro plynovou turbínu. [12]

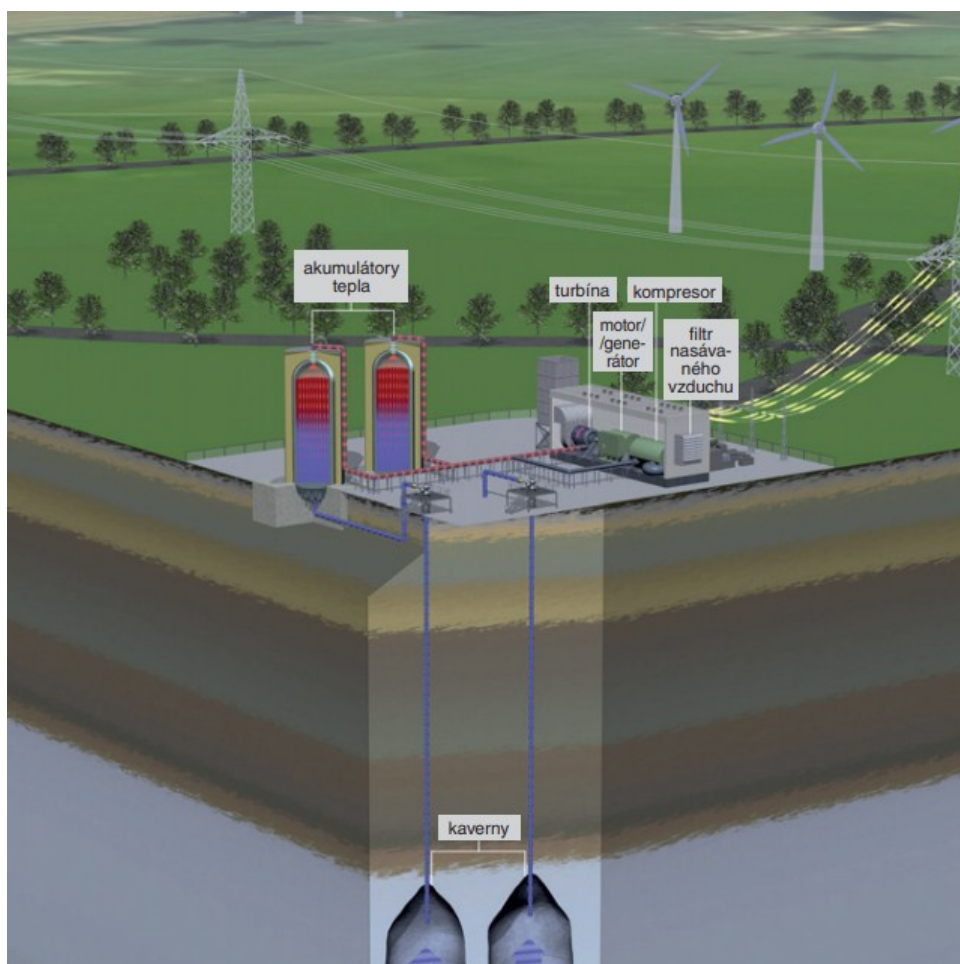
Na světě jsou v provozu pouze dvě elektrárny tohoto typu. Elektrárna Huntorf v Německu, která byla zprovozněna jako prototyp v roce 1978 a je označována jako první CAES elektrárna na světě. Elektrárna Huntorf disponuje výkonem 320 MW. První komerční CAES elektrárna byla postavena v USA v roce 1991 v McIntosh v Alabamě, ale do provozu se dostala až v roce 2010, její výkon je 110 MW. Účinnost obou elektráren se pohybuje okolo 50 procent. [12]

Adiabatická (A-CAES) - Jako zásobníky vzduchu se zde také používají podzemní jeskyně, vytěžená ložiska od ropy atd. Přívlastek adiabatická má technologie, protože využívá teplo vzniklé při kompresi vzduchu. Systémem tepelných výměníků se velké množství tepla znovu předá zpět vzduchu před turbínou, což přispívá ke zvýšení účinnosti systému. Účinnost systému je okolo 70%, to je podobná účinnost jako u přečerpávacích elektráren. Teplo je skladováno například v úložišti tepelné energie. [12]

Vzduch při stlačování vícestupňovým kompresorem na 70 bar, může dosahovat teplot až okolo 600 °C. Teplo můžeme uschovat do pevných materiálů, jako keramika, beton, nebo směsí tekutých solí a termo olejů. Teplo pokud uskladníme, můžeme využít následně pro ohřátí studeného vzduchu při expanzi z akumulátoru. Díky ohřívání expandovaného vzduchu docílujeme toho, že nemusíme souběžně používat chemické palivo (zemní plyn) při pohonu turbíny, turbína je poháněna pouze horkým vzduchem a díky tomu se netvoří emise CO₂. [12, 13]

Prozatím ještě není žádná elektrárna s touto technologií komerčně v provozu. Evropský projekt AA-CEAS (Advanced Adiabate Compressed Air Energy Storage) byl potvrzen výzkumem, který probíhal v letech 2003 až 2007, že je proveditelný. Na základě výsledků projektu se rozhodlo šest společností z německého průmyslu a výzkumu (společnosti RWE AG, General Electric AG, Ed. Züblin AG, Německé středisko pro letectví a kosmonautiku – DLR aj.), že adiabatický akumulární systém ukládání stačeného vzduchu ověří ve společném projektu, který se nazývá ADELE (Adiabater Druckluftspeicherfürdie Elektrizitätsversorgung). [13]

Cílem projektu ADELE bylo vybudování komerční tlakovzdušné elektrárny, která bude mít akumulční kapacitu 1 GWh a elektrický výkon by se měl pohybovat kolem 200 MW. Díky takovému výkonu by měla být schopná nahradit, co v nejkratším čase až čtyřicet větrných turbín se jmenovitým výkonem 5 MW. Schéma projektu ADELE můžeme vidět na obrázcích 2.7. [13]



Obrázek 2.7 – schéma projektu ADELE [13]

Isotermická (I-CAES) - Technologie I-CAES se snaží v první řadě předčít koncepcí CAES a A-CAES. Klasické technologie CAES a A-CAES využívají turbosoustrojí s velkým počtem expanzních změn a komprese, při kterých se vyskytují tepelné ztráty. Technologie I-CAES se zabývá těmito ztrátami a snaží se je překonat řízením tlaků a teplot během komprese a expanze. Tak, aby se křivky změn co nejvíce přibližovaly izotermickému ději, což zapříčiní snižování ztrát. K dosažení izotermického procesu je zapotřebí kontinuálně odebírat teplo ze vzduchu při kompresi a současně ho přidávat při expanzi. [14]

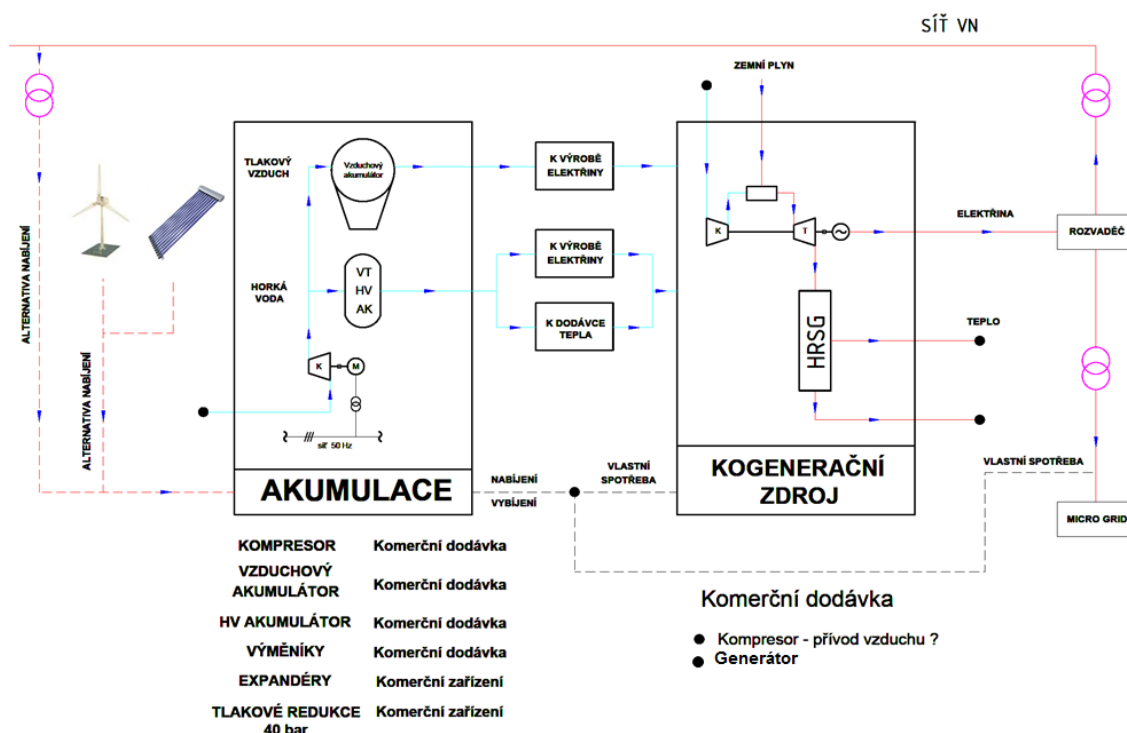
3. Popis zařízení

Koncepce akumulace vyvíjená Vysokou školou báňskou EC-CAES (Energy Central Compressed Air Energy Storage), pracuje spolu s klasickými energetickými zdroji, které zajišťují dodávky tepla, nebo elektřinu. To znamená, že může být zapojen do systému horkovodní kotel, ale také může být zapojena kogenerační jednotka s plynovou turbínou. Jedná se o decentralizovaný zdroj energie s vysokou účinností akumulace elektrické energie a potřebnou flexibilitou provozu. Zařízení dokáže dosáhnout špičkového elektrického výkonu během pár minut (tj. od 2 do 4 minut). [15]

Předmětem výzkumu a vývoje je decentralní energetická centrála s akumulací elektřiny jako celek - tudíž energetický zdroj spojený se systémem pro akumulaci elektřiny, kde oba systémy pracují společně. Decentralní energetický zdroj můžeme mít ve dvou variantách zapojení:

- Horkovodní kotel (plyn, biomasa, uhlí, alternativní paliva)
- Kogenerační jednotka s plynovou turbínou a horkovodním kotlem (HWB) pro dodávku tepla

Princip můžeme vidět na obrázku 3.1, kde je energetická centrála s akumulací elektřiny se zapojením kogeneračního zdroje s plynovou turbínou. [15]



Obrázek 3.1 – princip zapojení kogeneračního zdroje u energetické centrály s akumulací elektřiny [15]

Na pravé straně můžeme vidět energetický zdroj s klasickou kogenerační jednotkou s plynovou turbínou a s horkovodním kotlem HWB pro dodávku tepla, jako palivo zde můžeme mít zemní plyn, bioplyn, degazační plyn nebo jiné plynné či kapalné alternativní palivo vhodné pro plynovou turbínu. Taková kogenerační jednotka, jako decentralizovaný zdroj, dodává pro vlastní distribuční síť vysokého napětí nebo do nadřazené distribuční sítě. Teplo do vlastního rozvodu tepla. Měli bychom předpokládat, že část elektřiny bude na vlastní spotřebu. [15]

Zařízení pro akumulaci se skládá, z víceetapového nabíjecího kompresoru (K), který obsahuje chladiče vzduchu za každým stupněm, dále zde nalezneme zařízení pro akumulaci tepla z chladičů kompresoru horkovodní akumulátor (A2), jehož součástí je vyvíjena koncepce nádrže, kde je oddělené izobarické skladování dvou tekutin, dále zde je vzduchový akumulátor (A1), který může být např. kulový plynojem o tlaku 40 bar. Nakonec se zde nachází turbodmychadlo, které zajišťuje konstantní tlak při nabíjení vzduchového akumulátoru (A1). [15]

3.1 Popis funkce zařízení

Základní zapojení pouze s nezbytnými zařízeními, armaturami a akumulátory pro chod tohoto systému můžeme vidět na schématu č.1 a č.2. Schéma slouží k popisu funkce tohoto systému.

Úsek ve kterém se nachází nabíjecí kompresor (K) a horkovodní akumulátor (A2) je v provozu pouze v případě, když se akumuluje vzduch pro výrobu elektrické energie, tedy při nabíjení vzduchového kompresoru (A1) a současně dochází k nabíjení horkovodního akumulátoru (A2).

Úsek expandér (Ex) - přehřívák páry (Př) - parní turbína (PaT) je v provozu, když se vyrábí špičková elektřina z akumulované energie, jmenovitě z kompresního tepla. Vzhledem k tomu, že expandér (Ex) a nádrž kondenzátu (NK), může být při mimořádném režimu v provozu i ve fázi nabíjení vzduchového akumulátoru (A1) a horkovodního akumulátoru (A2), jsou tyto zařízení zahrnuta ve schématu.

Popis obsahuje následné body:

- Akumulace elektřiny - výroba tlakového vzduchu
- Provoz a Redukce tlaku vzduchu před vzduchovým akumulátorem (A1)
- Provoz a regulace horkovodního akumulátoru (A2)

3.2 Akumulace elektřiny - výroba tlakového vzduchu

Při akumulaci vzduchu pro výrobu elektrické energie je potřeba, aby byl zavřen ventil V14, který se nachází za vzduchovým akumulátorem (A1).

Protože dodávané množství vzduchu F3, které dodává nabíjecí kompresor (K), je během celého procesu akumulace konstantní, tak se vzrůstem tlaku vzduchu p_4 ve vzduchovém akumulátoru (A1), se budou snižovat otáčky turbodmychadla (zařízení pro korekci tlaku), díky tomu se bude snižovat dopravované množství vzduchu F3, které jde přes turbodmychadlo. Vzhledem k tomu, že dodávané množství vzduchu je konstantní, nebude se příliš měnit množství chladicí vody, která přichází do chladiče (ChK), čerpadlo Č2 udržuje konstantní teplotu T_1 v okruhu nabíjecí kompresor (K) a horkovodní akumulátor (A2). [15]

Jakmile je ve vzduchovém akumulátoru (A1) dosaženo požadovaného tlaku p_4 vzduchu 40bar, je fáze akumulace ukončena a nabíjecí kompresor (K) je odstaven. Souběžně se odstaví také čerpadlo Č2 a uzavře se ventil V2. Ideální situace nastává, když je velikost horkovodního akumulátoru (A2) v souladu s dobou nabíjení vzduchového akumulátoru (A1), a při odstavení nabíjecího kompresoru (K) je horkovodní akumulátor (A2) zcela zaplněn horkou vodou a pružný vak je obrácen směrem dolů a spočívá na spodním dnu. Tímto je celý cyklus akumulace uzavřen a systém je připravený na fázi vybíjení, tedy na výrobu špičkové elektrické energie z akumulace (z kompresního tepla). [15]

3.3 Provoz a redukce tlaku vzduchu před vzduchovým akumulátorem (A1)

Pro popis funkce práce vzduchového akumulátoru slouží schéma č. 2. Nutnou podmínkou pro využívání přinejmenším částí akumulovaného kompresního tepla z nabíjecího kompresoru (K) pro využití výroby špičkové elektrické energie je akumulace kompresního tepla v horké vodě s parametry 40 bar a 250 °C konstantně. Podmínkou pro dosažení těchto parametrů v horkovodním akumulátoru (A2) pak je činnost nabíjecího kompresoru (K) s konstantním tlakem na výstupu 40 bar, díky tomu máme v horkovodním akumulátoru (A2) teplotu 250 °C při tlaku 40 bar, díky těmto parametrům získáme v expandéru (Ex) co nejvyšší účinnost výroby páry do parní turbíny (PaT). Během dodávání vzduchu do vzduchového akumulátoru (A1) se tlak postupně zvyšuje od minimálního tlaku po provozní tlak 40 bar. Pokud energetická centrála s akumulací CAES obsahuje jako energetický zdroj kogenerační plynovou jednotku (KGJ) s plynovou turbínou, potom při prvním provozu akumulace se tlak p_4 ve vzduchovém akumulátoru (A1) zvyšuje od tlaku okolního tj. 1 bar až po provozní tlak tj. 40 bar. V případě každého dalšího provozu bude akumulace začínat na tlaku p_4 (zbytkový tlak po předchozí akumulaci), a tlak bude tedy $p_4 = p_5$. Tlak p_5 je tlak před plynovou turbínou kogenerační jednotky (KGJ), při kterém byl ukončen předešlý provoz vybíjení vzduchového akumulátoru (A1), např. 10 bar. [15]

Konstantní tlak p_3 za nabíjecím kompresorem (K) 40 bar by šel provozovat jen pomocí ventilu mezi nabíjecím kompresorem (K) a vzduchovým akumulátorem (A1), ale taková regulace by byla velmi ztrátová. [15]

Proto se v rámci vývoje v tomto projektu navrhla točivá redukce (TR) pro udržování konstantního tlaku p_3 za nabíjecím kompresorem (K), jenž využívá redukci tlaku na plynové turbíně k pohonu vlastního dmyhadla zajišťující samostatnou dodávku vzduchu do vzduchového akumulátoru (A1) a snižuje tak vlastní spotřebu z nabíjecího kompresoru (K). Točivá redukce (TR) se skládá z vysokootáčkové vzduchové turbíny, jenž pomáhá redukovat tlak (40 bar) vzduchu z nabíjecího kompresoru (K) na postupně zvyšující se tlak ve vzduchovém akumulátoru (A1) a také pohání vysokootáčkové vzduchové dmyhadlo, které dodává nasávaný vzduchu z okolí také do vzduchového akumulátoru (A1), tedy pracuje také do postupně zvyšujícího tlaku p_4 ve vzduchovém akumulátoru (A1). [15]

Předpokladem pro start nabíjecího kompresoru (K) je, že bude ventil V11 a V13 uzavřen. Po startu akumulačního kompresoru (K) se částečně otevírá ventil V12, který

bude sloužit z počátku jako odfuk, díky tomu se nemusí vzduch vypouštět do okolí, ale půjde rovnou do vzduchového akumulátoru (A1). V této fázi se tlak p_3 na výstupu z nabíjecího kompresoru (K) reguluje ventilem V12 na požadovanou hodnotu podle algoritmu startu kompresoru až po dosažení provozního tlaku 40 bar. [15]

Po docílení provozního tlaku vzduchu za kompresorem (K) tj. p_3 se uzavře ventil V12 a otevře se ventil V11. Nyní začíná samotný nabíjecí proces akumulace elektřiny, rozjíždí se turbína a dmychadlo přes točivou redukci (TR). Při správně navržené točivé redukci (TR) a při docílení konstantního tlaku p_3 vzduchu za nabíjecím kompresorem (K) 40 bar, by se mělo podařit dosáhnout požadovaného tlaku p_4 ve vzduchovém akumulátoru (A1) za dobu stanovenou projektantem. [15]

3.4 Provoz a regulace horkovodního akumulátoru (A2)

O chlazení nabíjecího kompresoru (K) se stará chladicí okruh čerpadla Č2, to je chladič kompresoru (ChK) a horkovodní akumulátor (A2). Požadovanou teplotu T_1 horké vody v horkovodním akumulátoru (A2) reguluje regulátor (R_{T_1}), jako akční člen je zde čerpadlo Č2. Požadovaný tlak p_1 v horkovodním akumulátoru (A2) pomáhá zajistit expanzní nádrž (ExN) ve které je dusík. V případě potřeby je zde dvoupolohová regulace, která udržuje tlak mezi minimem $p_{1\min}$ a maximem $p_{1\max}$. Rozsah tlaků mezi $p_{1\min}$ a $p_{1\max}$ musí být stanoven tak, aby po poklesu tlaku pod hranici $p_{1\min}$ nedošlo k velkému snížení teploty T_1 vody v horkovodním akumulátoru (A2), čímž by pokleslo množství uvolněné páry v expandéru (Ex) a následně by došlo ke snížení výroby elektřiny na parní turbíně (PaT). Regulace při poklesu tlaku p_1 pod $p_{1\min}$ je následovná, čerpadlo Č3 zvýší tlak p_1 dotlačením vody z nádrže na kondenzát (NK) na tlak $p_{1\min} + \Delta p$, přičemž se tlak Δp volí tak, aby se v součtu nedosáhlo na tlak $p_{1\max}$. V případě, zvýšení tlaku p_1 nad $p_{1\max}$, dochází ke zhoršení účinnosti nabíjecího kompresoru (K). [15]

a) Proces odstavení nabíjecího kompresoru (K).

Jakmile je dosaženo ve vzduchovém akumulátoru (A1) požadovaného tlaku 40 bar, je fáze akumulace ukončena a nabíjecí kompresor (K) se odstavuje. Odstavení akumulační fáze probíhá následovně, odstaví se nabíjecí kompresor (K) současně se odstaví čerpadlo Č2 a uzavře se ventil V2. Úsek chladič nabíjecího kompresoru (ChK) a horkovodní akumulátor (A2) je uzavřený a naplněný horkou vodou o teplotě T_1

250 °C při tlaku p_1 40 bar. Ventily V2, V4 a V6 jsou uzavřeny. Systém je nyní připraven na fázi vybíjení a výrobu špičkové elektřiny. [15]

b) Vybíjení horkovodního akumulátoru (A2) a následná výroba špičkové elektrické energie z kompresního tepla. Úsek Expandér (Ex) - parní turbína (PaT)

Tato fáze provozu neprobíhá samostatně, ale pouze jen jako součást výroby špičkové elektrické energie z akumulace na kogenerační jednotce (KGJ), přičemž výroba špičkové elektrické energie z akumulace, může probíhat i samostatně bez této fáze. Takže zařízení pro výrobu špičkové elektrické energie z kompresního tepla Expandér (Ex) - parní turbína (PaT) nebude uvedeno do provozu, případně nemusí být ani instalováno v celém systému. Potom tedy musím kompresní teplo využít někde jinde, např. pro dodávku tepla. Předpoklad pro vybíjení je, že horkovodní akumulátor (A2) je zcela zaplněn horkou vodou o tlaku 40 bar a teplotě T_1 250 °C (saturační teplota).

Při vybíjení se otevře ventil V1 a zapne se čerpadlo Č1. Uzavře se ventil V2. Čerpadlo Č1 musí pracovat tak, aby horká voda z horkovodního akumulátoru (A2) byla vytlačena za stejnou nebo kratší dobu, jak vzduch ze vzduchového akumulátoru (A1). Aby množství vzduchu, které se odebírá ze vzduchového akumulátoru (A1) a je stále udržované na požadované konstantní hodnotě, tak se množství dodávané studené vody čerpadlem Č1 do spodní části horkovodního akumulátoru (A2) musí udržovat rovněž na stanovené konstantní hodnotě, podle poklesu tlaku p_4 ve vzduchovém akumulátoru (A1). Čerpadlo Č1 je tedy nutné mít připojené na regulaci průtoku vody F6, žádaná hodnota průtoku se bude regulovat dle tlaku p_4 vzduchu ve vzduchovém akumulátoru (A1). [15]

S malým zpožděním např. 2 sekundy, aby se zajistilo prohřátí hmot v přehříváku páry (Př) se otevřou ventily V6, V7 a V4. Ventil V4 se připojí k regulaci tlaku páry p_2 . Ventil V6 se připojí k regulaci teploty páry T_2 . Pokud při otevření ventilu V4 bude potřeba dodat na turbínu (PaT) předepsaný trend vzrůstu tlaku na turbíně, pak tento trend se zajistí regulačním ventilem turbíny. Díky nízkým parametrům páry, 6 bar a 220 °C, se předpokládá, že parní turbína (PaT) se bude moci spouštět přímo s provozními parametry. [15]

Studená voda, která je dopravována do spodní části horkovodního akumulátoru (A2) čerpadlem Č1, které reguluje průtok vody, vytlačuje horkou vodu z horní části horkovodního akumulátoru (A2) do expandéru (Ex). Jakmile nastane chvíle, kdy je veškerá horká voda z horkovodního akumulátoru (A2) vytlačena do expandéru (Ex),

tak se zavře ventil V4 a V6, současně se odstaví čerpadlo Č1 a také se zavře ventil V1. [15]

c) Regulace vybíjení horkovodního akumulátoru (A2)

Množství F6 studené vody, která je dodávána čerpadlem Č1 do horkovodního akumulátoru (A2) se reguluje dle požadované hodnoty generované podle změny tlaku vzduchu p_4 ve vzduchovém akumulátoru (A1). Studená voda vytlačuje z horní části horkovodního akumulátoru (A2) horkou vodu do expandéru (Ex).[15]

Funkce expandéru (Ex). Tlak p_2 v expandéru (Ex) se udržuje na konstantní hodnotě 6 bar, díky regulačnímu ventilu (V4). V expandéru (Ex) se odloučená voda dále odvádí do zařízení pro dodávku tepla. Hladina vody v expandéru (Ex) je regulována za pomoci ventilu V8. Studenou vodu do horkovodního akumulátoru (A2) dodává čerpadlo Č1 z nádrže na kondenzát (NK). Pára, která se uvolní v expandéru (Ex) dále putuje do předehříváku páry (Př) a následně na parní turbínu (PaT). Teplota páry T_2 před parní turbínou (PaT) se reguluje na konstantní teplotu T_2 ohřevem v přehříváku páry (Př), kam přichází horká voda z horkovodního akumulátoru (A2). Akční člen zde je ventil V6. [15]

4. Návrh zařízení pro udržování konstantního tlaku

Praktická část diplomové práce se zabývá vypracováním analytického modelu zařízení pro udržování konstantního tlaku vzduchu mezi nabíjecím kompresorem a vzduchovým akumulátorem. Analytický model zařízení se skládá z více analytických modelů, a to konkrétně z nabíjecího kompresoru a turbodmyhadla. Výpočty jsou dělány v počítačovém výpočtovém programu EES.

Zařízení pro udržování konstantního tlaku vzduchu využívá tlakového rozdílu vzduchu. Je umístěno mezi nabíjecím kompresorem a vzduchovým akumulátorem (viz. obrázek 4.1). Kdyby zde nebylo žádné zařízení, ale pouze jen škrťací ventil byla by tlaková energie mařena (nevyužilo by se tlakového rozdílu mezi nabíjecím kompresorem a vzduchovým akumulátorem), teplota vzduchu by se díky škrcení zvyšovala, tudíž by se do vzduchového akumulátoru nevešlo tolik vzduchu, proto je zde zařízení, které využívá rozdíl tlaků a pomáhá naplnit vzduchový akumulátor. Zařízení pro udržování konstantního tlaku vzduchu (turbodmyhadlo) se skládá z turbíny a dmyhadla, kde turbína je poháněna tlakovou energií, která vzniká díky rozdílu tlaků. Turbína je spojena pomocí hřídele s dmyhadlem. Dmyhadlo je poháněno turbínou u turbodmyhadla. Dmyhadlo u turbodmyhadla dodává zhruba 10% vzduchu při nabíjení. Vzhledem k tomu, že turbodmyhadlo pracuje na principu rozdílů tlaků, tak se jeho výkon mění v průběhu nabíjení vzduchového akumulátoru. Na začátku nabíjení, kdy je rozdíl tlaků vzduchu mezi vzduchovým akumulátorem a nabíjecím kompresorem největší, je dodávané množství vzduchu pomocí turbodmyhadla nejvyšší, v průběhu nabíjení se rozdíl tlaků snižuje a tím i dodávané množství vzduchu z turbodmyhadla. A to až do okamžiku, kdy rozdíl tlaků bude téměř nulový. Jakmile nastane nulový rozdíl tlaků, turbína se zastaví a tím pádem i dmyhadlo, v tento okamžik nabíjení je u konce. Zařízení v diplomové práci je počítáno v provozním režimu. To znamená, že se pohybujeme ve vzduchovém akumulátoru mezi tlaky 16,38 bar až 40 bar. Druhý možný provoz by se dal nazvat startovní režim. Vzduchový akumulátor by se nabíjel z atmosférického tlaku, tzn. od 1 bar do 40 bar (první nabíjení po instalaci zařízení, nebo po vypuštění vzduchového akumulátoru na atmosférický tlak kvůli údržbě). Druhý provoz (startovní režim) se v diplomové práci řešit nebude.

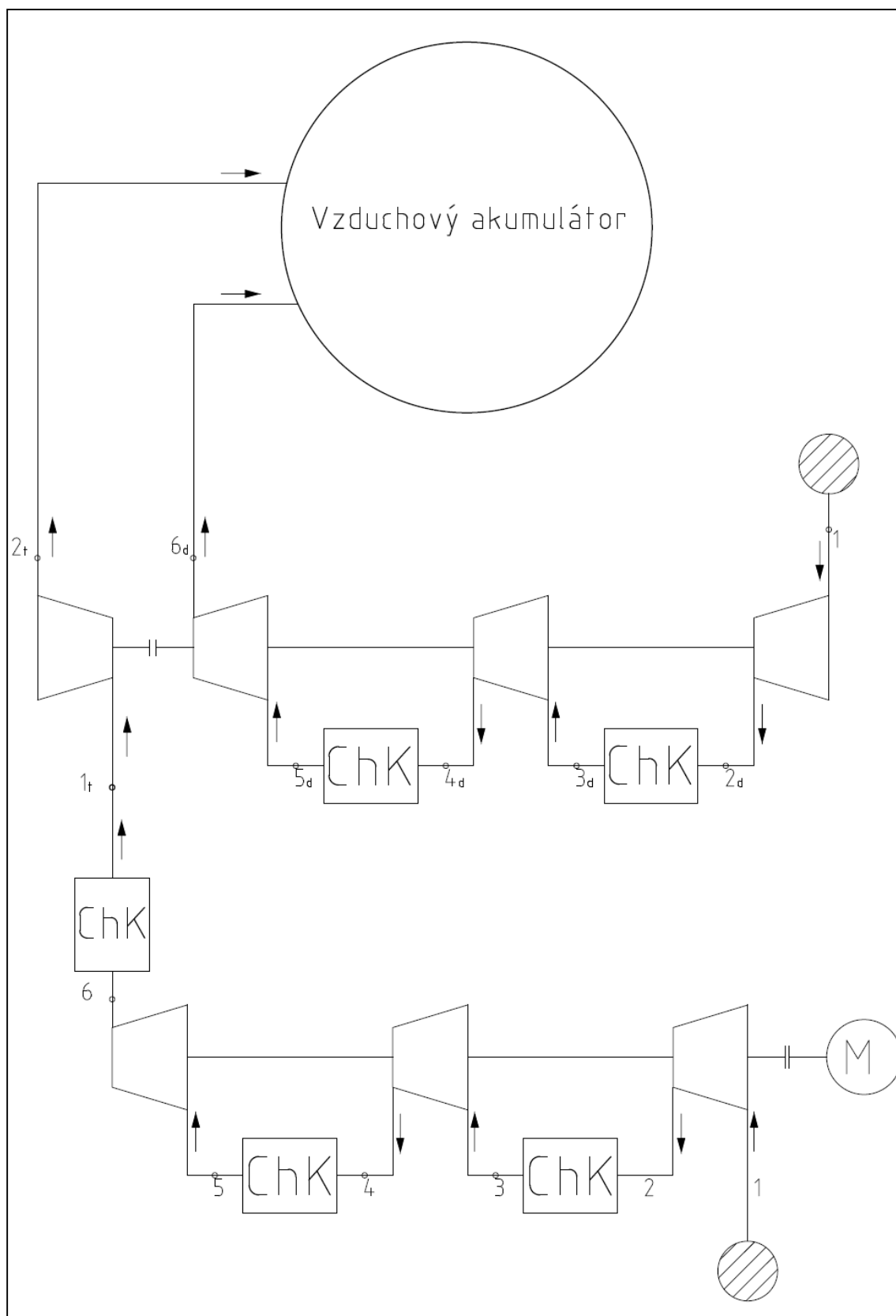
Vypracované analytické modely zařízení jsou rozdělené na pracovní kroky. Pouze nabíjecí kompresor pracuje v jednom pracovním režimu. Jeho výkonnost se nemění v průběhu nabíjení. Změní se pouze v případě, když se bude nabíjet vzduchový

akumulátor jinou dobu než jednu hodinu. Pokud bude potřeba nabíjet např. dvě hodiny, změní se nasávané množství vzduchu, tudíž se změní příkon nabíjecího kompresoru.

Díky tomu, že výkon turbodmychadla se mění s rozdílem tlaků, je analytický model rozdělen do deseti kroků. Mezi jednotlivými kroky je 400 sekundový úsek, při době nabíjení jedna hodina. Každý krok pro nás bude obsahovat důležité hodnoty jako tlak ve vzduchovém akumulátoru, teplotu vzduchu na výstupech a množství dodávaného vzduchu dmychadlem u turbodmychadla.

Analytický model zařízení pro udržování konstantního tlaku vzduchu je řešen jako ideální zařízení. To znamená, že turbína a dmychadlo v turbodmychadle pracují během nabíjení stále s jednou účinností (v našem případě 80%), přestože se mění otáčky, výkonnost a provozní podmínky turbodmychadla.

Kdybychom řešili model zařízení reálně, účinnost a výkonnost obou zařízení by se měnila se změnou otáček. Protože každé zařízení je konstruováno a postaveno na neměnný provozní režim (stejně otáčky), v tomto bodě nám výrobce dokáže zajistit danou výkonnost a účinnost. Pokud se otáčky mění jako v našem případě, výrobce nedokáže zajistit stejnou výkonnost v dané účinnosti v jiných otáčkách, jak je zařízení konstruováno. Pokud se podíváme na dmychadlo, které je vícestupňové, tak se při změně otáček mění nejen výkonnost, ale také tlakový poměr mezi jednotlivými stupni. Tento problém by se dal vyřešit tlakovou redukcí mezi jednotlivými stupni, která by zajišťovala stejný tlakový poměr.



Obrázek 4.1 – schéma zařízení pro udržování konstantního tlaku vzduchu

4.1 Zadané hodnoty

Hodnoty byly zadány po konzultaci s vedoucím diplomové práce. Hodnoty vycházejí z projektu EC-CAES (Energy Central Compressed Air Energy Storage) vyvíjeného Vysokou školou báňskou - Technickou univerzitou Ostrava.

Tabulka 4.1 - zadané hodnoty

Název	Hodnoty	Značka
Objem vzduchového akumulátoru	5 000 m ³	V
Plynová konstanta	287 J/kg*K	r
Teplota vzduchu v akumulátoru na začátku nabíjení	50 °C	t _{start}
Teplota vzduchu v akumulátoru na konci nabíjení	120 °C	t _{ifnal}
Teplota vzduchu nasávaného	15 °C	t ₁
Teplota za prvním ChK u nabíjecího kompresoru	80 °C	t ₃
Teplota za druhým ChK u nabíjecího kompresoru	80 °C	t ₅
Teplota za třetím ChK u nabíjecího kompresoru	150 °C	t _{1,t}
Teplota za prvním ChK u dmyhadla	35 °C	t _{3,d}
Teplota za druhým ChK u dmyhadla	35 °C	t _{5,d}
Teplota vzduchu referenční	0 °C	t _{ref}
Termická účinnost	80 %	η
Tlak vzduchu nasávaného	1,01325 bar	p ₁
Tlak vzduchu referenční	1,01325 bar	p _{ref}
Tlak v akumulátoru na začátku	16,38 bar	p _{start}
Tlak v akumulátoru konečný	40 bar	p _{final}
Vlhkost vzduchu nasávaného	0,006384 %	w
Vlhkost vzduchu referenční	0,006384 %	w _{ref}

4.2 Výpočet nasávaného množství vzduchu (m)

Výpočet nasávaného množství vzduchu se počítá, abychom věděli, kolik vzduchu se musí dostat do vzduchového akumulátoru, aby se nabíjel jednu hodinu. Pomocí nasávaného množství vzduchu se spočítá výkon turbíny u turbodmychadla a na základě výkonu se vypočítá výkonnost dmychadla u turbodmychadla.

Váha vzduchu na začátku nabíjení ve vzduchovém akumulátoru - hodnoty byly zadány po konzultaci s vedoucím diplomové práce. Objem vzduchového akumulátoru (V) 5 000 m³, tlak vzduchu v akumulátoru na začátku nabíjení (p_{start}) 16,38 bar, plynová konstanta (r) 287 J/kg*K a předpokládaná teplota na začátku (t_{start}) je 50 °C.

$$m_{start} = \frac{p_{start} * 100\,000 * V}{r * t_{start} + 273,15} = 88\,307 \text{ [kg]} \quad (4.1)$$

Váha vzduchu ve vzduchovém akumulátoru na konci nabíjení - Objem vzduchového akumulátoru (V) 5 000 m³, tlak vzduchu v akumulátoru na konci nabíjení (p_{final}) 40 bar, plynová konstanta (r) 287 J/kg*K a předpokládaná teplota na konci (t_{final}) je 120 °C.

$$m_{final} = \frac{p_{final} * 100\,000 * V}{r * t_{final} + 273,15} = 177\,251 \text{ [kg]} \quad (4.2)$$

Výpočet množství vzduchu kolik musím dodat do vzduchového akumulátoru za jeden krok - celkové množství vzduchu, které je potřeba dostat do vzduchového akumulátoru se rozdělí na devět úseků, které trvají 400 sekund. Protože mezi kroky je devět úseků, ve kterých je určité množství dopravováno do akumulátoru.

$$m_{krok} = \frac{m_{final} - m_{start}}{9} = 9\,882 \text{ [kg]} \quad (4.3)$$

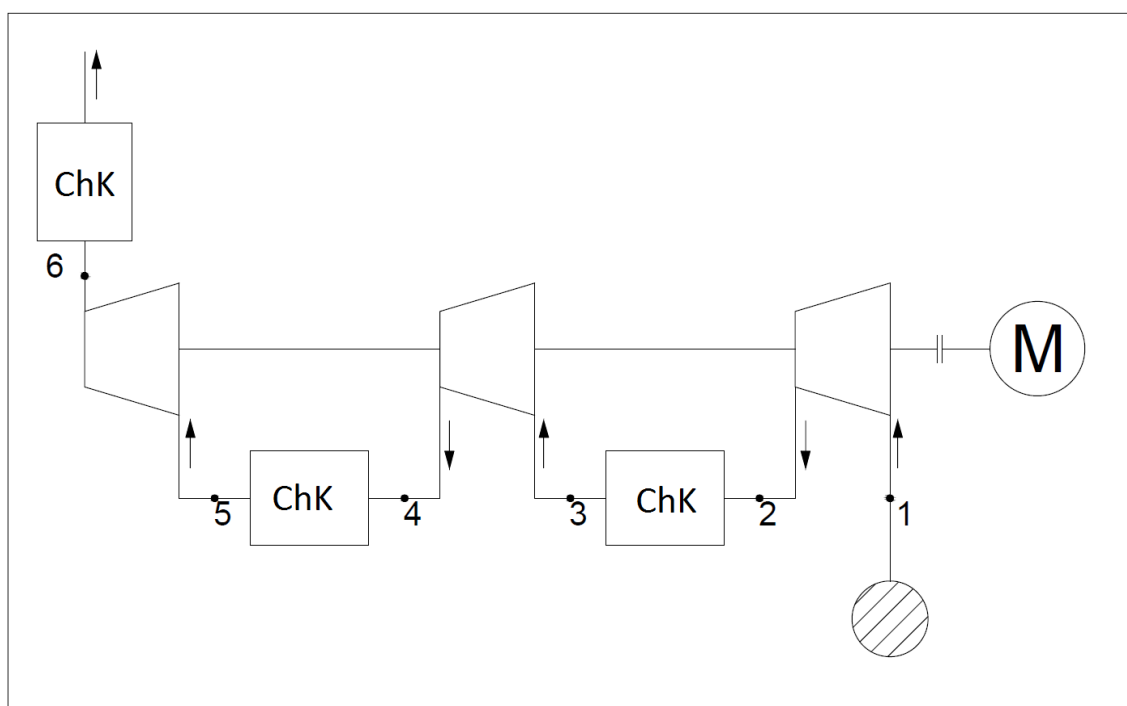
Množství nasávaného vzduchu sekundově - z množství vzduchu za úsek se spočítá, množství vzduchu (m) sekundově, které musí nasávat nabíjecí kompresor.

$$m = \frac{m_{krok}}{400} = 24,705 \text{ [kg/s]} \quad (4.4)$$

4.3 Analytický model nabíjecího kompresoru

Analytický model nabíjecího kompresoru se skládá ze tří částí. Každá část představuje jeden stupeň kompresoru, tudíž se jedná o víceetapňový kompresor přesněji kompresor tříetapňový. Za jednotlivými stupni se nacházejí chladiče vzduchu, které ochlazují stlačený vzduch vždy z teploty výstupu stupně kompresoru na teplotu $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ v případě prvních dvou stupňů kompresoru, za třetím stupněm kompresoru se vzduch vychlazuje na $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Za posledním stupněm se vychlazuje vzduch na $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, aby po expanzi na turbíně u turbodmychadla teplota vzduchu nebyla příliš vysoká, dalším důvodem je ohřátí chladicí vody na $250\text{ }^{\circ}\text{C}$, pro další technologii. Schéma kompresoru můžeme vidět na obrázku 4.2. Nabíjecí kompresor se počítá, aby bylo zřejmé s jakými příkony, tlaky a teplotami kompresor pracuje.

Nabíjecí kompresor slouží především k vytváření konstantního tlaku před turbodmychadlem. Vytvářený tlak by měl být 40 bar.



Obrázek 4.2 – schéma nabíjecího kompresoru

První stupeň nabíjecího kompresoru - vstupní hodnoty v bodě 1 jsou následovné tlak (p_1) 1,01325 bar, teplota (t_1) 15 °C, měrná hustota (w) 0,006384 %, termická účinnost (η) 80% a nasávané množství vzduchu (m) 24,705 kg/s.

Entalpie 1 ideální a entropie 1 ideální - hodnoty entalpie a entropie jsou získány pomocí přednastavené funkce ve výpočetním programu EES, kde se zadávají vstupní hodnoty na sání (tlak, teplota a měrná vlhkost) - počítalo se s vlhkým vzduchem. Entropie 1 se zjišťuje, proto aby se následně mohla dopočítat entalpie 2 ideální. Vždy od vypočtené entalpie nebo entropie se odečítala entropie nebo entalpie referenčního bodu (normální podmínky), proto aby se docílila přesnost výpočtu vzhledem ke své poloze na planetě Zemi. Díky odečtení se dostanou vždy stejné výsledky, ať se nacházíme v České republice, nebo např. v USA.

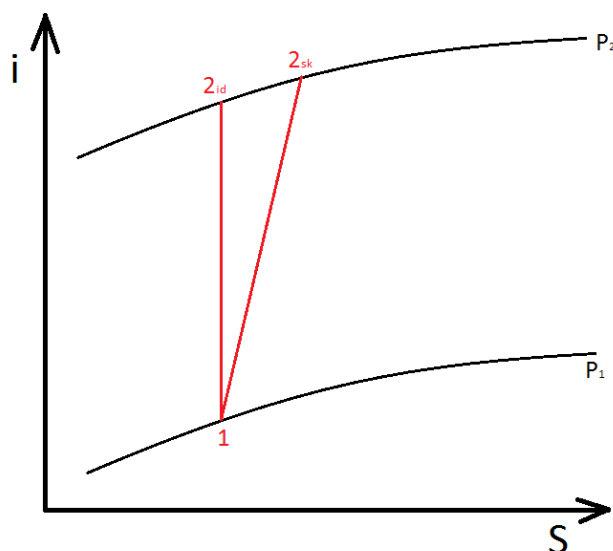
Referenční hodnoty $t_{ref} = 0 [^{\circ}C]$, $p_{ref} = 1,01325 [bar]$, $w_{ref} = 0,006384 [\%]$

Vstupní podmínky $t_1 = 15 [^{\circ}C]$, $p_1 = 1,01325 [bar]$, $w = 0,006384 [\%]$

$$i_{1,id} = 15,27 [kJ/kg]$$

Entropie 2 ideální - pokud se podíváme na obrázek i-s diagramu kompresoru 4.3, můžeme vidět, že se entropie s nárůstem tlaku nemění. Tudíž můžeme napsat:

$$s_{2,id} = s_{1,id} \quad (4.5)$$



Obrázek 4.3 – i-s diagram kompresoru

Tlak za prvním stupněm - tlak ve druhém bodě spočítáme pomocí vztahu 4.6, kde tlak p_6 je tlak, kterého chceme dosáhnout za posledním stupněm kompresoru tj. 40 bar.

$$p_2 = p_1 * \left(\frac{p_6}{p_1}\right)^{\frac{1}{3}} = 3,45 \text{ [bar]} \quad (4.6)$$

Teplota 2 ideální - teplota za prvním stupněm byla získána pomocí přednastavené funkce pro výpočet entropie v EES. Kdy je potřeba znát tlak za prvním stupněm (p_2), entropii 2 ideální ($s_{2,id}$) a měrnou vlhkost (w). Počítáme ji proto, abychom mohli dopočítat entalpii 2 ideální.

$$t_{2,id} = 135,1 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Entalpie 2 ideální - pomocí přednastavené funkce pro výpočet entalpie v EES, se vypočetla hodnota entalpie ideální v bodě 2 za prvním stupněm v kompresoru. Pro výpočet je třeba znát tlak za prvním stupněm (p_2), teplotu za prvním stupněm ($t_{2,id}$) a měrnou vlhkost (w).

$$i_{2,id} = 137,8 \text{ [kJ/kg]}$$

Příkon prvního stupně ideálně - výpočet se provedl dle vztahu 4.7. Množství nasátého vzduchu (m) je 24,705 kg/s.

$$P_{př,id} = m * (i_{2,id} - i_{1,id}) = 3\,027 \text{ [kJ/s]} \quad (4.7)$$

Entalpie 2 skutečná - byla použita rovnice pro výpočet termické účinnosti, kde se rovnice upravila, aby se vypočítala entropie 2 skutečná v bodě dva. Termická účinnost (η) je 80%. Entalpie 2 skutečná se počítá, proto aby se mohla dále spočítat skutečná teplota za prvním stupněm kompresoru ($t_{2,sk}$).

$$\eta = \frac{i_{2,id}}{i_{2,sk}} \rightarrow i_{2,sk} = \frac{i_{2,id}}{\eta} = 172,2 \text{ [kJ/kg]} \quad (4.8)$$

Teplota 2 skutečná - teplota za prvním stupněm skutečná se získala pomocí přednastavené funkce pro výpočet entropie v EES. Kdy je potřeba znát tlak za prvním stupněm (p_2), entalpii 2 skutečnou ($i_{2,sk}$) a měrnou vlhkost (w).

$$t_{2,sk} = 168,6 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Příkon prvního stupně skutečný - výpočet se provedl dle vztahu 4.7. Množství nasátého vzduchu (m) je 24,705 kg/s.

$$P_{př,sk} = m * (i_{2,sk} - i_{1,id}) = 3\,878 \text{ [kJ/s]} \quad (4.7)$$

Druhý stupeň nabíjecího kompresoru - vstupní hodnoty v bodě 3 jsou následovné: tlak (p_3) 3,45 bar, teplota (t_3) 80 °C, měrná hustota (w) 0,006384 %, množství vzduchu (m) 24,705 kg/s a termická účinnost (η) 80%.

Entalpie 3 ideální a entropie 3 ideální - hodnoty entalpie a entropie jsou získány pomocí přednastavené funkce ve výpočetním programu EES, kde se zadávají vstupní hodnoty na sání (tlak, teplota a měrná vlhkost) - počítalo se s vlhkým vzduchem.

Vstupní podmínky $t_3 = 80 [^{\circ}\text{C}]$, $p_3 = 3,45 [\text{bar}]$, $w = 0,006384 [\%]$

$$i_{3,id} = 81,51 [\text{kJ/kg}]$$

Entropie 4 ideální - entropie s nárůstem tlaku nemění (viz. obrázek i-s diagramu kompresoru 4.3) Tudíž můžeme napsat:

$$s_{4,id} = s_{3,id} \quad (4.5)$$

Tlak za druhým stupněm - tlak ve čtvrtém bodě spočítáme pomocí vztahu 4.6, kde tlak p_6 je tlak, kterého chceme dosáhnout za posledním stupněm kompresoru tj. 40 bar.

$$p_4 = p_3 * \left(\frac{p_6}{p_1}\right)^{\frac{1}{3}} = 11,75 [\text{bar}] \quad (4.6)$$

Teplota 4 ideální - teplotu za druhým stupněm získáme pomocí přednastavené funkce pro výpočet entropie v EES. Kdy je potřeba znát tlak za druhým stupněm (p_4), entropii 4 ideální ($s_{4,id}$) a měrnou vlhkost (w). Počítáme ji proto, abychom mohli dopočítat entalpii 4 ideální.

$$t_{4,id} = 225,9 [^{\circ}\text{C}]$$

Entalpie 4 ideální - pomocí přednastavené funkce pro výpočet entalpie v EES, se vypočetla hodnota entalpie ideální v bodě 4 za druhým stupněm v kompresoru. Pro výpočet je potřeba znát tlak za druhým stupněm (p_4), teplotu za druhým stupněm ($t_{4,id}$) a měrnou vlhkost (w).

$$i_{4,id} = 231,5 [\text{kJ/kg}]$$

Příkon druhého stupně ideálně - výpočet byl proveden dle vztahu 4.7. Množství vzduchu (m), které je přiváděno do druhého stupně je 24,705 kg/s.

$$P_{př,id,4} = m * (i_{4,id} - i_{3,id}) = 3\,705 [\text{kJ/s}] \quad (4.7)$$

Entalpie 4 skutečná - byla použita rovnice pro výpočet termické účinnosti, kde se rovnice upravila, aby se vypočítala entalpie 4 skutečná v bodě čtyři. Termická účinnost (η) je 80%. Entalpii 4 skutečnou se počítá, proto aby se mohla dále spočítat skutečná teplota za druhým stupněm kompresoru ($t_{4,sk}$).

$$\eta = \frac{i_{4,id}}{i_{4,sk}} \rightarrow i_{4,sk} = \frac{i_{4,id}}{\eta} = 289,4 \text{ [kJ/kg]} \quad (4.8)$$

Teplota 4 skutečná - teplota za druhým stupněm skutečná se získala pomocí přednastavené funkce pro výpočet entalpie v EES. Kdy je potřeba znát tlak za druhým stupněm (p_4), entalpii 4 skutečnou ($i_{4,sk}$) a měrnou vlhkost (w).

$$t_{4,sk} = 281,2 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Příkon druhého stupně skutečný - výpočet byl proveden dle vztahu 4.7. Množství vzduchu (m), které je přiváděno do druhého stupně je 24,705 kg/s.

$$P_{př,sk,4} = m * (i_{4,sk} - i_{3,id}) = 5 \text{ 135 [kJ/s]} \quad (4.7)$$

Třetí stupeň nabíjecího kompresoru - vstupní hodnoty v bodě 5 jsou následovné tlak (p_5) 11,75 bar, teplota (t_5) 80 °C, měrná hustota (w) 0,006384 %, množství vzduchu (m) 24,705 kg/s a termická účinnost (η) 80%.

Entalpie 5 ideální a entropie 5 ideální - hodnoty entalpie a entropie jsou získány pomocí přednastavené funkce ve výpočetním programu EES, kde se zadávají vstupní hodnoty na sání (tlak, teplota a měrná vlhkost) - počítalo se s vlhkým vzduchem.

$$\text{Vstupní podmínky } t_5 = 80 \text{ [}^\circ\text{C]}, p_5 = 11,75 \text{ [bar]}, w = 0,006384 \text{ [%]}$$

$$i_{5,id} = 81,51 \text{ [kJ/kg]}$$

Entropie 6 ideální - entropie s nárůstem tlaku nemění (viz. obrázek i-s diagramu kompresoru 4.3). Tudíž můžeme napsat:

$$s_{6,id} = s_{5,id} \quad (4.5)$$

Tlak za třetím stupněm - tlak v šestém bodě spočítáme pomocí vztahu 4.6, kde tlak p_6 je tlak, kterého chceme dosáhnout za posledním stupněm kompresoru tj. 40 bar. Výpočet slouží jako kontrola, protože tlak musí se rovnat 40 bar.

$$p_6 = p_5 * \left(\frac{p_6}{p_1}\right)^{\frac{1}{3}} = 40 \text{ [bar]} \quad (4.6)$$

Teplota 6 ideální - teplotu za třetím stupněm získáme pomocí přednastavené funkce pro výpočet entropie v EES. Kdy je potřeba znát tlak za třetím stupněm (p_6), entropii 6 ideální ($s_{6,id}$) a měrnou vlhkost (w). Počítáme ji proto, abychom mohli dopočítat entalpii 6 ideální.

$$t_{6,id} = 225,9 [^{\circ}C]$$

Entalpie 6 ideální - pomocí přednastavené funkce pro výpočet entalpie v EES, se vypočetla hodnota entalpie ideální v bodě 6 za třetím stupněm v kompresoru. Pro výpočet bylo potřeba znát tlak za třetím stupněm (p_6), teplotu za třetím stupněm ($t_{6,id}$) a měrnou vlhkost (w).

$$i_{6,id} = 231,5 [kJ/kg]$$

Příkon třetího stupně ideálně - výpočet je vypočten dle vztahu 4.7. Množství vzduchu (m), které je přiváděno do třetího stupně je 24,705 kg/s.

$$P_{př,id,6} = m * (i_{6,id} - i_{5,id}) = 3\,705 [kJ/s] \quad (4.7)$$

Entalpie 6 skutečná - byla použita rovnice pro výpočet termické účinnosti, kde se rovnice upravila, aby se vypočítala entropie 6 skutečná v bodě šest. Termická účinnost (η) je 80%. Entalpii 6 skutečnou počítáme, abychom mohli spočít skutečnou teplotu za třetím stupněm kompresoru ($t_{6,sk}$).

$$\eta = \frac{i_{6,id}}{i_{6,sk}} \rightarrow i_{6,sk} = \frac{i_{6,id}}{\eta} = 289,4 [kJ/kg] \quad (4.8)$$

Teplota 6 skutečná - teplota za třetím stupněm skutečná byla získána pomocí přednastavené funkce pro výpočet entalpie v EES. Kdy je potřeba znát tlak za třetím stupněm (p_6), entalpii 6 skutečnou ($i_{6,sk}$) a měrnou vlhkost (w).

$$t_{6,sk} = 281,2 [^{\circ}C]$$

Příkon třetího stupně skutečný - výpočet byl proveden podle vztahu 4.7. Množství vzduchu (m), které je přiváděno do třetího stupně je 24,705 kg/s.

$$P_{př,sk,6} = m * (i_{6,sk} - i_{5,id}) = 5\,135 [kJ/s] \quad (4.7)$$

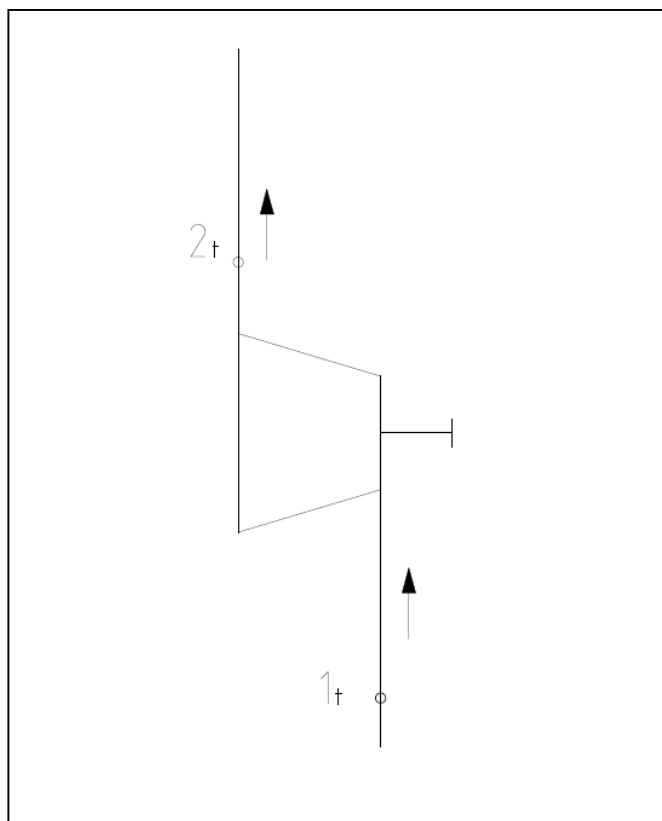
Příkon celkový skutečný - celkový příkon nabíjecího kompresoru byl spočten, sečtením všech tří skutečných příkonů jednotlivých stupňů kompresoru.

$$P_{cel} = P_{př,sk} + P_{př,sk,4} + P_{př,sk,6} = 14\,148 [kJ/s] \quad (4.8)$$

4.4 Analytický model turbíny u turbodmychadla

Analytický model turbíny u turbodmychadla se počítá, aby se dostal výkon, který bude dodáván dmychadlu v průběhu nabíjení vzduchového akumulátoru. Jeho výkon se bude měnit s tlakem ve vzduchovém akumulátoru. Tlak na vstupu do turbíny bude neměnný a jeho hodnota bude 40 bar (tudiž tlak, který nám dodá nabíjecí kompresor za posledním stupněm). Maximální výkon bude mít turbína u turbodmychadla na začátku nabíjení, kdy ve vzduchovém akumulátoru bude tlak 16,38 bar (což je tlak, kterého budeme dosahovat při běžném provozu zařízení po výrobě špičkové energie, tedy po vyprázdnění vzduchového akumulátoru). Maximální výkon turbíny je tvořen, díky velkému tlakovému rozdílu. Výkon turbíny se bude s rostoucím tlakem ve vzduchovém akumulátoru snižovat, jakmile se budeme přibližovat k požadovanému tlaku 40 bar, turbína bude dodávat minimální výkon, téměř nulový a vzduch bude jen procházet, ale nebude mít energii roztočit lopatky turbíny.

Výpočet zde uvedený bude výpočet pro první krok turbíny, kdy bude ve vzduchovém akumulátoru počátečný tlak 16,38 bar ($p_{2,t}$) a konstantní tlak před turbínou 40 bar ($p_{1,t}$).



Obrázek 4.4 – schéma turbíny turbodmychadla

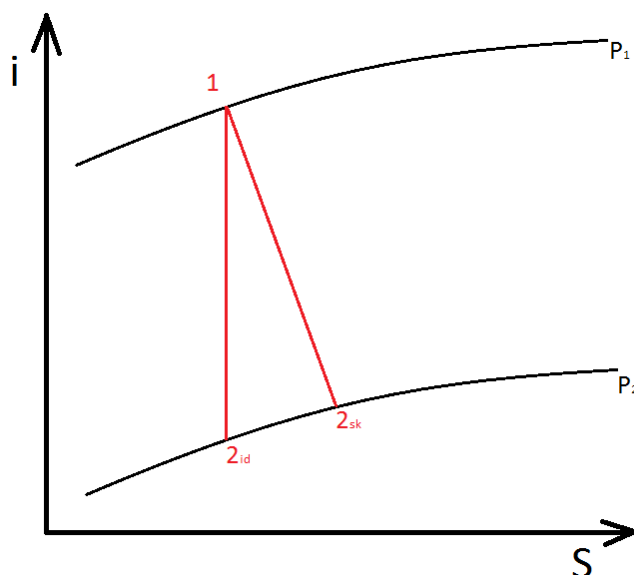
Vstupní hodnoty do turbíny - jsou to hodnoty, které dostaneme na konci nabíjecího kompresoru, tudíž vstupní hodnoty v bodě 1_t jsou následovné tlak ($p_{1,t}$) 40 bar, teplota ($t_{1,t}$) 150 °C, měrná hustota (w) 0,006 %, množství vzduchu (m) 24,705 kg/s, termická účinnost (η) 80% a tlak ve vzduchovém akumulátoru ($p_{2,t}$) 16,38 bar.

Entalpie 1 ideální a entropie 1 ideální - hodnoty entalpie a entropie jsou získány pomocí přednastavené funkce ve výpočetním programu EES, kde se zadávají vstupní hodnoty na sání (tlak, teplota a měrná vlhkost) - počítalo se s vlhkým vzduchem.

$$i_{1,id,t} = 152,2 \text{ [kJ/kg]}$$

Entropie 2 ideální - pokud se podíváme na obrázek i-s diagramu kompresoru 4.5, můžeme vidět, že se entropie s nárůstem tlaku nemění. Tudíž můžeme napsat:

$$s_{2,id,t} = s_{1,id,t} \quad (4.5)$$



Obrázek 4.5 – i-s diagram turbíny

Teplota 2 ideální - teplotu za turbínou získáme pomocí přednastavené funkce pro výpočet entropie v EES. Kdy je potřeba znát tlak za turbínou stupněm ($p_{2,t}$), entropii 2 ideální ($s_{2,id,t}$) a měrnou vlhkost (w). Počítáme ji proto, abychom mohli dopočítat entalpii 2 ideální.

$$t_{2,id,t} = 55,28 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

Entalpie 2 ideální - pomocí přednastavené funkce pro výpočet entalpie v EES, byla spočtena hodnota entalpie ideální v bodě dva za turbínou. Pro výpočet je potřeba znát tlak za turbínou ($p_{2,t}$), teplotu za turbínou ($t_{2,id,t}$) a měrnou vlhkost (w).

$$i_{2,id,t} = 55,51 \text{ [kJ/kg]}$$

Výkon turbíny ideálně - výpočet výkonu turbíny byl proveden na základě vztahu 4.7. Množství vzduchu (\dot{m}), které je přiváděno do turbíny je 24,705 kg/s.

$$P_{v,id,t} = \dot{m} * (i_{1,id,t} - i_{2,id,t}) = 2\,390 \text{ [kJ/s]} \quad (4.7)$$

Entalpie 2 skutečná - byla použita rovnice pro výpočet termické účinnosti, kde se rovnice upravila, aby se vypočítala entalpie 2 skutečná v bodě dva. Termická účinnost (η) je 80%. Entalpii 2 skutečnou počítáme, abychom mohli dále spočítat skutečnou teplotu za turbínou ($t_{2,sk,t}$).

$$\eta = \frac{i_{1,id,t} - i_{2,sk,t}}{i_{1,id,t} - i_{2,id,t}} \rightarrow i_{2,sk,t} = -\eta * (i_{1,id,t} - i_{2,id,t}) + i_{1,id,t} = 74,86 \text{ [kJ/kg]} \quad (4.9)$$

Teplota 2 skutečná - teplota za turbínou skutečná byla získána pomocí přednastavené funkce pro výpočet entalpie v EES. Kdy je potřeba znát tlak za turbínou ($p_{2,t}$), entalpii 2 skutečnou ($i_{2,sk,t}$) a měrnou vlhkost (w).

$$t_{2,sk} = 74,28 \text{ [°C]}$$

Výkon turbíny skutečný - výpočet výkonu turbíny se provedl pomocí vztahu 4.7. Množství vzduchu (\dot{m}), které je přiváděno do turbíny je 24,705 kg/s.

$$P_{v,id,t} = \dot{m} * (i_{1,id,t} - i_{2,sk,t}) = 1\,912 \text{ [kJ/s]} \quad (4.7)$$

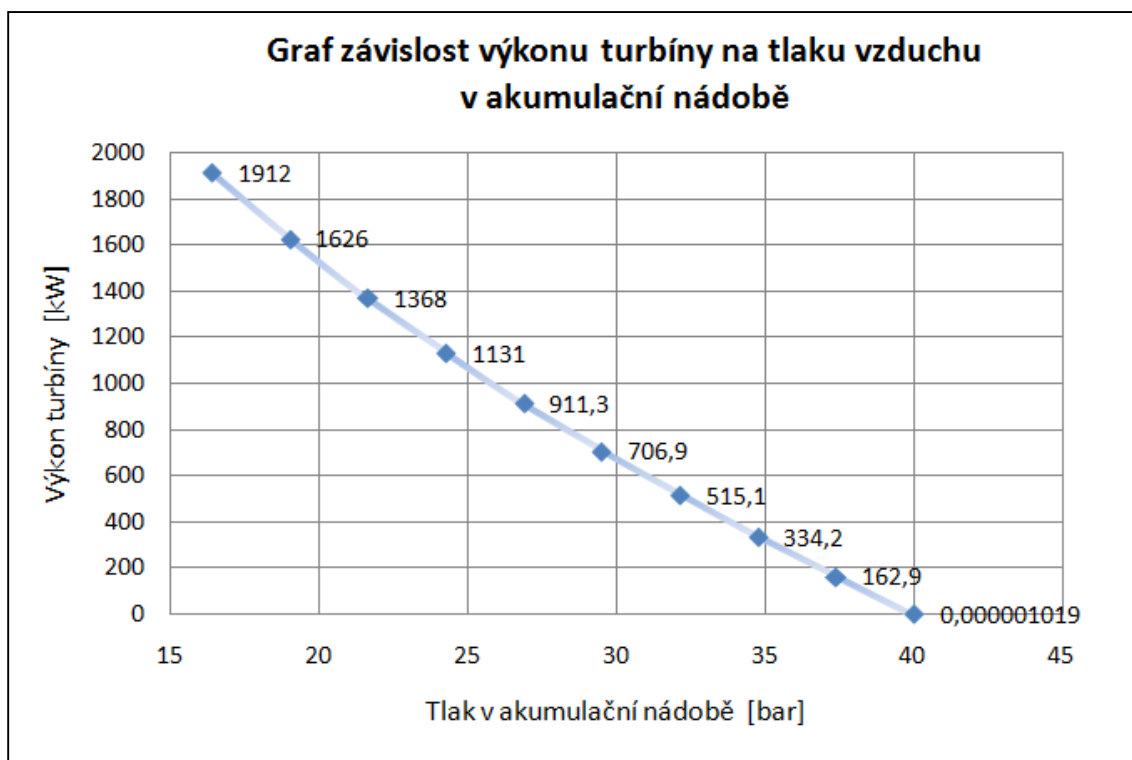
Mění se hodnoty závislosti na tlaku ve vzduchovém akumulátoru - ve výpočtu turbíny můžeme vidět výpočet pro první krok, kdy tlak ve vzduchovém akumulátoru je 16,38 bar. Jednotlivé výsledky v krocích jsou vypsány v tabulce 4.2, kde můžeme vidět výkony turbíny při různých tlacích v akumulátoru, teploty vzduchu na výstupu a tlakový rozdíl v určitém kroku při nabíjení.

Tabulka 4.2 - charakteristika turbíny v jednotlivých krocích

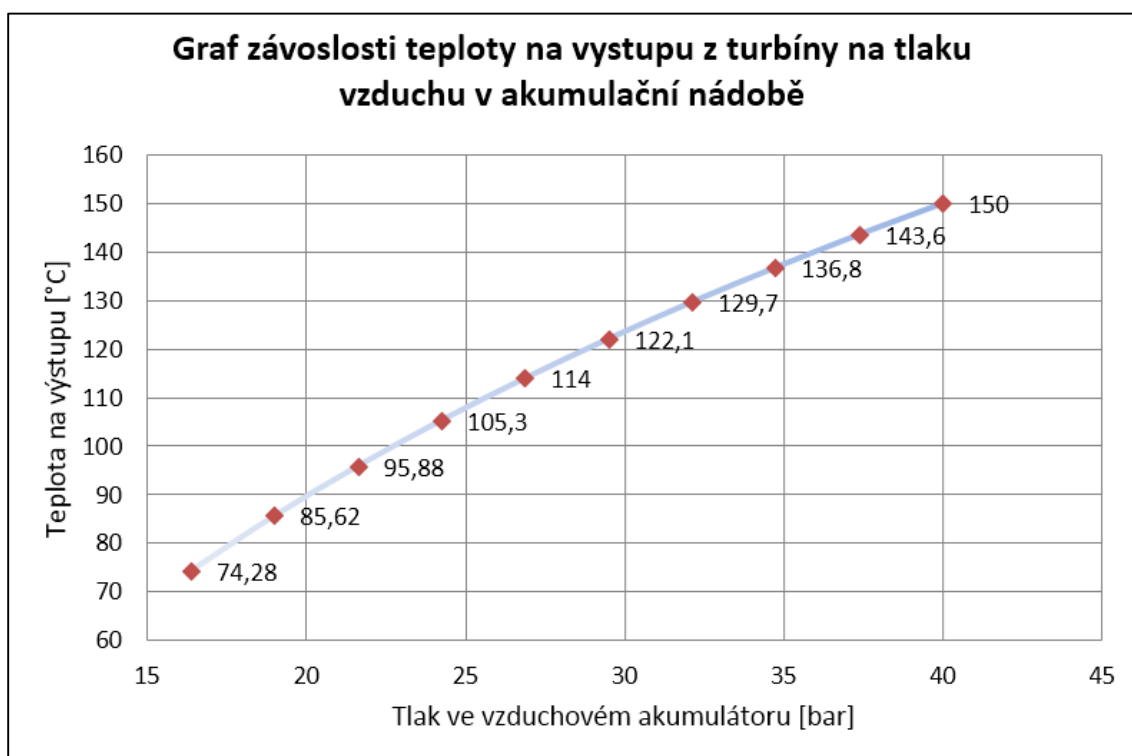
	Tlak v akumulátoru [bar]	Tlakový rozdíl [bar]	Výkon [kW]	Teplota vzduchu na výstupu [°C]
1	16,38	23,62	1912	74,27
2	19	21	1626	85,61
3	21,63	18,37	1368	95,87
4	24,25	15,75	911,3	105,3
5	26,88	13,12	706,3	114
6	29,5	10,5	515,1	122,1
7	32,13	7,87	334,1	129,7
8	34,75	5,25	334,2	136,8
9	37,38	2,62	162,9	143,6
10	40	0	0,000001019	150

Podle tabulky byly sestaveny grafy závislostí mezi tlakem vzduchu ve vzduchovém akumulátoru a výkonem turbíny (obrázek 4.6). Na prvním grafu můžeme sledovat, jak se mění výkon se zvyšujícím se tlakem vzduchu ve vzduchovém akumulátoru. Jak bylo zmíněno v úvodu, turbína bude dodávat dmychadlu největší výkon na začátku nabíjecího cyklu, kdy bude rozdíl tlaků nevyšší (23,62 bar). Výkon turbíny tedy na začátku bude 1 912 kW. Jakmile se tlak vzduchu v akumulátoru bude zvyšovat, tlakový rozdíl bude klesat a tím dojde i k poklesu výkonu turbíny až na nulu.

Druhý graf závislosti znázorňuje závislost mezi tlakem vzduchu ve vzduchovém akumulátoru a teplotou vzduchu na výstupu z turbíny (obrázek 4.7). Na grafu můžeme vidět, že se teplota roste s tlakem v akumulátoru. Teplota vzduchu na výstupu je na počátku nabíjecího cyklu je 74,25 °C na konci nabíjecího cyklu se teplota vzduchu vystoupá na 150 °C.



**Obrázek 4.6 – graf závislost výkonu turbíny na tlaku vzduchu
ve vzduchovém akumulátoru**

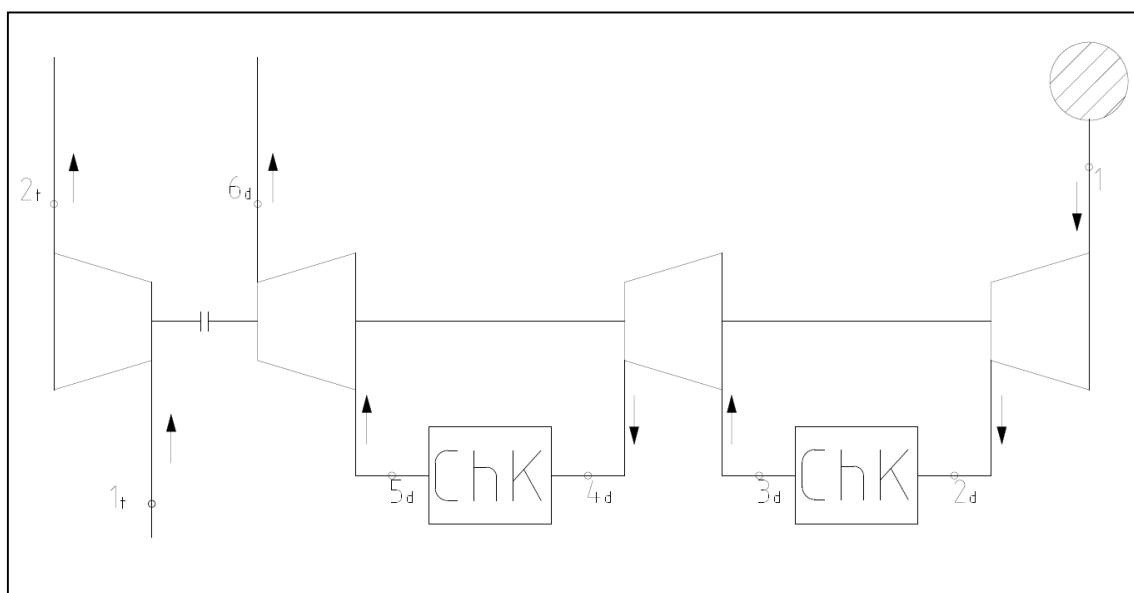


**Obrázek 4.7 – graf závislosti teploty na výstupu z turbíny na tlaku vzduchu
ve vzduchovém akumulátoru**

4.5 Analytický model dmyhadla u turbodmyhadla

Analytický model dmyhadla vychází z modelu turbodmyhadla, to se skládá turbíny a dmyhadla počítáme ho, abychom se dozvěděli, kolik bude dodávat dmyhadlo vzduchu do vzduchového akumulátoru na základě výkonu vzduchové turbíny. Dmyhadlo bude dodávat nejvíce vzduchu na začátku nabíjení vzduchového akumulátoru, protože turbína bude dodávat maximální výkon dmyhadlu, díky tlakovému rozdílu.

Model se skládá ze tří částí, každá část představuje jeden stupeň dmyhadla. Podobně jako u nabíjecího kompresoru. Za jednotlivými stupni se nacházejí chladiče vzduchu, které ochlazují stlačený vzduch vždy z teploty výstupu stupně dmyhadla na teplotu 35 °C v případě prvních dvou stupňů dmyhadla, za třetím stupněm dmyhadla se chladič nenachází. Nasávaný vzduch má stejné parametry jako nasávaný vzduch u nabíjecího kompresoru. Na příkladu si ukážeme výpočet prvního kroku výpočtu dmyhadla u turbodmyhadla.



Obrázek 4.8 – schéma turbodmyhadla

Model dmyhadla je vypočten pomocí vytvořeného analytického modelu turbodmyhadla v programu EES (analytický model turbodmyhadla je k dispozici v příloze). Model dmyhadla u turbodmyhadla pracuje na základně dopravovaného množství vzduchu (m) turbínou. Díky tomu je schopen si dopočítat v jednotlivých krocích nasávané množství vzduchu z okolí (m_d). Na základě nasávaného množství

vzduchu (m_d) je možno dopočíst kolik vzduchu dodá dmychadlo do vzduchového akumulátoru. Uvedený výpočet je pro nasávané množství 5,171 kg/s, výpočet tak může sloužit jako kontrola. Na konci výpočtu se dostane požadovaný příkon dmychadla u turbodmychadla. Výsledky nasávaných množství vzduchu (m_d) u jednotlivých kroků jsou uvedeny v tabulce 4.3. Dále v ní můžeme vidět, jakou bude mít teplotu dopravovaný vzduch na výstupu za dmychadlem.

Tabulka 4.3 - nasávané množství vzduchu dmychadlem a výstupní teploty z dmychadla

	Tlak v akumulátoru [bar]	Nasávané množství vzduchu (m_d) [kg/s]	Teplota vzduchu na výstupu [°C]
1	16,38	5,171	159,8
2	19	4,159	166,8
3	21,63	3,338	173
4	24,25	2,65	178,6
5	26,88	2,063	183,6
6	29,5	1,551	188,2
7	32,13	1,099	192,5
8	34,75	0,6955	169,4
9	37,38	0,3313	200,1
10	40	2,02E-09	203,5

Vstupní hodnoty do dmychadla u turbodmychadla - vstupní hodnoty nasávaného vzduchu v bodě 1_d jsou tlak (p_1) 1,01325 bar, teplota (t_1) 15 °C, měrná hustota (w) 0,006384 %, termická účinnost (η) 80%. Nasávané množství vzduchu (m_d) u výpočtu budu uvádět 5,171 kg/s, které jsou získány na základě analytického modelu turbodmychadla, nasávané množství vzduchu (m_d) odpovídá výkonu na turbíně 1912 kW a tlaku vzduchu ve vzduchovém akumulátoru 16,38 bar.

Entalpie 1 ideální a entropie 1 ideální - hodnoty entalpie a entropie jsou získány pomocí přednastavené funkce ve výpočetním programu EES, kde se zadávají vstupní hodnoty na sání (tlak, teplota a měrná vlhkost) - počítalo se s vlhkým vzduchem. Entropie 1 se zjišťuje, aby se následně mohla dopočítat entalpie 2 ideálně.

Vstupní podmínky $t_1 = 15 [^{\circ}\text{C}]$, $p_1 = 1,01325 [\text{bar}]$, $w = 0,006384 [\%]$

$$i_{1,id,d} = 15,27 [kJ/kg]$$

Entropie 2 ideální - entropie s nárůstem tlaku nemění (viz. obrázek i-s diagramu kompresoru 4.3). Tudíž můžeme napsat:

$$s_{2,id,d} = s_{1,id,d} \quad (4.5)$$

Tlak za prvním stupněm - tlak ve druhém bodě spočítáme pomocí vztahu 4.6, kde tlak $p_{6,d}$ je tlak, který je aktuálně ve vzduchovém akumulátoru tj. 16,38 bar.

$$p_{2,d} = p_1 * \left(\frac{p_{6,d}}{p_1}\right)^{\frac{1}{3}} = 2,562 \text{ [bar]} \quad (4.6)$$

Teplota 2 ideální - teplota za prvním stupněm byla získána pomocí přednastavené funkce pro výpočet entropie v EES. Kdy je potřeba znát tlak za prvním stupněm ($p_{2,d}$), entropii 2 ideální ($s_{2,id,d}$) a měrnou vlhkost (w). Teplotu počítáme, abychom mohli dopočítat entalpii 2 ideální.

$$t_{2,id,d} = 102,1 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Entalpie 2 ideální - pomocí přednastavené funkce pro výpočet entalpie v EES, byla spočtena hodnota entalpie ideální v bodě 2 za prvním stupněm v dmychadla. Pro výpočet je potřeba znát tlak za prvním stupněm ($p_{2,d}$), teplotu za prvním stupněm ($t_{2,id,d}$) a měrnou vlhkost (w).

$$i_{2,id,d} = 104 \text{ [kJ/kg]}$$

Příkon prvního stupně ideálně - výpočet se provedl dle vztahu 4.7. Množství vzduchu (m_d) 5,171 kg/s.

$$P_{př,id,d} = m_d * (i_{2,id,d} - i_{1,id,d}) = 458,9 \text{ [kJ/s]} \quad (4.7)$$

Entalpie 2 skutečná - byla použita rovnice pro výpočet termické účinnosti, kde se rovnice upravila, aby se vypočítala entropie 2 skutečná v bodě dva. Termická účinnost (η) je 80%. Entalpii 2 skutečnou počítáme, abychom mohli dále spočíst skutečnou teplotu za prvním stupněm kompresoru ($t_{2,sk,d}$).

$$\eta = \frac{i_{2,id,d}}{i_{2,sk,d}} \rightarrow i_{2,sk,d} = \frac{i_{2,id,d}}{\eta} = 130 \text{ [kJ/kg]} \quad (4.8)$$

Teplota 2 skutečná - teplota za prvním stupněm skutečná byla získána pomocí přednastavené funkce pro výpočet entropie v EES. Kdy je potřeba znát tlak za prvním stupněm ($p_{2,d}$), entalpii 2 skutečnou ($i_{2,sk,d}$) a měrnou vlhkost (w).

$$t_{2,sk,d} = 127,5 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Příkon prvního stupně skutečný - výpočet se provedl dle vztahu 4.7. Množství vzduchu (m_d) je 5,171 kg/s.

$$P_{př,sk,d} = m_d * (i_{2,sk,d} - i_{1,id,d}) = 593,3 \text{ [kJ/s]} \quad (4.7)$$

Druhý stupeň dmyhadla u turbodmyhadla - vstupní hodnoty v bodě 3_d jsou následovné tlak ($p_{3,d}$) 2,562 bar, teplota za výměníkem ($t_{3,d}$) 35 °C, měrná hustota (w) 0,006384 %, množství vzduchu (m_d) 5,171 kg/s a termická účinnost (η) 80%

Entalpie 3 ideální a entropie 3 ideální - hodnoty entalpie a entropie jsou získány pomocí přednastavené funkce ve výpočetním programu EES, kde se zadávají vstupní hodnoty na sání (tlak, teplota a měrná vlhkost) - počítalo se s vlhkým vzduchem.

Vstupní podmínky $t_{3,d} = 35 [^{\circ}\text{C}]$, $p_{3,d} = 2,562 [\text{bar}]$, $w = 0,006384 [\%]$

$$i_{3,id,d} = 35,65 [\text{kJ/kg}]$$

Entropie 4 ideální - entropie s nárůstem tlaku nemění (viz. obrázek i-s diagramu kompresoru 4.3). Tudíž můžeme napsat:

$$s_{4,id,d} = s_{3,id,d} \quad (4.5)$$

Tlak za druhým stupněm - tlak ve čtvrtém bodě spočítáme pomocí rovnice 4.6, kde tlak $p_{6,d}$ je tlak, který je aktuálně ve vzduchovém akumulátoru tj. 16,38 bar a tlak p_1 je tlak nasávaného vzduchu 1,01325 bar.

$$p_{4,d} = p_{3,d} * \left(\frac{p_{6,d}}{p_1} \right)^{\frac{1}{3}} = 6,478 [\text{bar}] \quad (4.6)$$

Teplota 4 ideální - teplota za druhým stupněm byla získána pomocí přednastavené funkce pro výpočet entropie v EES. Kdy je potřeba znát tlak za druhým stupněm ($p_{4,d}$), entropii 4 ideální ($s_{4,id,d}$) a měrnou vlhkost (w). Teplotu počítáme, abychom mohli dopočítat entalpii 4 ideální.

$$t_{4,id,d} = 128 [^{\circ}\text{C}]$$

Entalpie 4 ideální - pomocí přednastavené funkce pro výpočet entalpie v EES, byla spočtena hodnota entalpie ideální v bodě 4 za druhým stupněm. Pro výpočet je potřeba znát tlak za druhým stupněm ($p_{4,d}$), teplotu za druhým stupněm ($t_{4,id,d}$) a měrnou vlhkost (w).

$$i_{4,id,d} = 130,5 [\text{kJ/kg}]$$

Příkon druhého stupně ideálně - výpočet se provedl dle vztahu 4.7. Množství vzduchu (m_d), které je přiváděno do druhého stupně je 5,171 kg/s.

$$P_{př,id,d,4} = m_d * (i_{4,id,d} - i_{3,id,d}) = 490,5 [\text{kJ/s}] \quad (4.7)$$

Entalpie 4 skutečná - byla použita rovnice pro výpočet termické účinnosti, kde se rovnice upravila, aby se vypočítala entalpie 4 skutečná v bodě dva. Termická účinnost (η) je 80%. Entalpii 4 skutečnou počítáme, abychom mohli dále spočítat skutečnou teplotu za prvním stupněm kompresoru ($t_{4,sk,d}$).

$$\eta = \frac{i_{4,id,d}}{i_{4,sk,d}} \rightarrow i_{4,sk,d} = \frac{i_{4,id,d}}{\eta} = 163,1 \text{ [kJ/kg]} \quad (4.8)$$

Teplota 4 skutečná - teplota za druhým stupněm skutečná byla získána pomocí přednastavené funkce pro výpočet entropie v EES. Kdy je potřeba znát tlak za druhým stupněm ($p_{4,d}$), entalpii 4 skutečnou ($i_{4,sk,d}$) a měrnou vlhkost (w).

$$t_{4,sk,d} = 159,8 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Příkon druhého stupně skutečný - výpočet se provedl dle vztahu 4.7. Množství vzduchu (m_d), které je přiváděno do druhého stupně je 5,171 kg/s.

$$P_{př,sk,4,d} = m_d * (i_{4,sk,d} - i_{3,id,d}) = 659,2 \text{ [kJ/s]} \quad (4.7)$$

Třetí stupeň dmyhadla u turbodmyhadla- vstupní hodnoty v bodě 5 jsou následovné tlak ($p_{5,d}$) 6,478 bar, teplota za výměníkem ($t_{5,d}$) 35 °C, měrná hustota (w) 0,006384 %, množství vzduchu (m_d) 5,171 kg/s a termická účinnost (η) 80%.

Entalpie 5 ideální a entropie 5 ideální - hodnoty entalpie a entropie jsou získány pomocí přednastavené funkce ve výpočetním programu EES, kde se zadávají vstupní hodnoty na sání (tlak, teplota a měrná vlhkost) - počítalo se s vlhkým vzduchem.

$$\text{Vstupní podmínky } t_{5,d} = 35 \text{ [}^\circ\text{C]}, p_{5,d} = 6,478 \text{ [bar]}, w = 0,006384 \text{ [%]}$$

$$i_{5,id,d} = 35,65 \text{ [kJ/kg]}$$

Entropie 6 ideální - entropie s nárůstem tlaku nemění (viz. obrázek i-s diagramu kompresoru 4.3). Tudíž můžeme napsat:

$$s_{6,id,d} = s_{5,id,d} \quad (4.5)$$

Tlak za třetím stupněm - tlak ve šestém bodě spočítáme pomocí rovnice 4.6, kde tlak $p_{6,d}$ je tlak, který je aktuálně ve vzduchovém akumulátoru tj. 16,38 bar a tlak p_1 je tlak nasávaného vzduchu 1,01325 bar. Výpočet slouží jako kontrola, zda se počítalo správně s tlaky. Tlak musel vyjít 16,38 bar.

$$p_{6,d} = p_{5,d} * \left(\frac{p_{6,d}}{p_1}\right)^{\frac{1}{3}} = 16,38 \text{ [bar]} \quad (4.6)$$

Teplota 6 ideální - teplota za třetím stupněm byla získána pomocí přednastavené funkce pro výpočet entropie v EES. Kdy je potřeba znát tlak za třetím stupněm ($p_{6,d}$), entropii 6 ideální ($s_{6,id,d}$) a měrnou vlhkost (w). Počítáme ji proto, abychom mohli dopočítat entalpii 6 ideální.

$$t_{6,id,d} = 128 [^{\circ}C]$$

Entalpie 6 ideální - pomocí přednastavené funkce pro výpočet entalpie v EES, byla spočtena hodnota entalpie ideální v bodě 6 za třetím stupněm. Pro výpočet je potřeba znát tlak za třetím stupněm ($p_{6,d}$), teplotu za třetím stupněm ($t_{6,id,d}$) a měrnou vlhkost (w).

$$i_{6,id,d} = 130,5 [kJ/kg]$$

Příkon třetího stupně ideálně - výpočet se provedl dle vztahu 4.7. Množství vzduchu (m_d) 5,171 kg/s.

$$P_{př,id,6,d} = m_d * (i_{6,id,d} - i_{5,id,d}) = 490,5 [kJ/s] \quad (4.7)$$

Entalpie 6 skutečná - byla použita rovnice pro výpočet termické účinnosti, kde se rovnice upravila, aby se vypočítala entropie 6 skutečná v bodě šest. Termická účinnost (η) je 80%. Entalpii 6 skutečnou počítáme, abychom mohli dále spočíst skutečnou teplotu za třetím stupněm kompresoru ($t_{6,sk,d}$).

$$\eta = \frac{i_{6,id,d}}{i_{6,sk,d}} \rightarrow i_{6,sk,d} = \frac{i_{6,id,d}}{\eta} = 163,1 [kJ/kg] \quad (4.8)$$

Teplota 6 skutečná - teplota za třetím stupněm skutečná se získala pomocí přednastavené funkce pro výpočet entalpie v EES. Kdy je potřeba znát tlak za třetím stupněm ($p_{6,d}$), entalpii 6 skutečnou ($i_{6,sk,d}$) a měrnou vlhkost (w).

$$t_{6,sk,d} = 159,8 [^{\circ}C]$$

Příkon třetího stupně skutečný - výpočet se provedl dle vztahu 4.7. Množství vzduchu (m_d) 5,171 kg/s.

$$P_{př,sk,6,d} = m_d * (i_{6,sk,d} - i_{5,id,d}) = 659,2 [kJ/s] \quad (4.7)$$

Příkon celkový skutečný - Celkový příkon dmyhadla se spočetl sečtením všech tří stupňů příkonu skutečného dmyhadla.

$$P_{cel,d} = P_{př,sk,d} + P_{př,sk,4,d} + P_{př,sk,6,d} = 1\,912 [kJ/s] \quad (4.8)$$

Příkon dmyhadla vyšel 1 912 kW, což odpovídá výkonu turbíny, který dodá dmyhadlu, tudíž analytický model pro dmyhadlo pracuje správně.

Na základě vypočteného nasávaného vzduchu (m_d) v krocích je možno dopočítat kolik vzduchu dodá dmychadlo do vzduchového akumulátoru v jednotlivých úsecích. V tabulce 4.4 můžeme vidět kolik je dmychadlo schopno dodat množství vzduchu do akumulátoru za úsek a celkově za nabíjecí cyklus.

Výpočet dodaného množství vzduchu za jeden úsek - pro výpočet je potřeba znát hodnoty kroků, které ohraničují jednotlivý úsek. Pro příklad je zde uveden výpočet prvního úseku, kde $m_{d,1}$ je 5,171 kg/s a $m_{d,2}$ je 4,159 kg/s. Doba jednoho úseku je 400 vteřin.

$$m_{d,u} = \frac{m_{d,1} + m_{d,2}}{2} * 400 = 1\,866 \text{ [kg]} \quad (4.10)$$

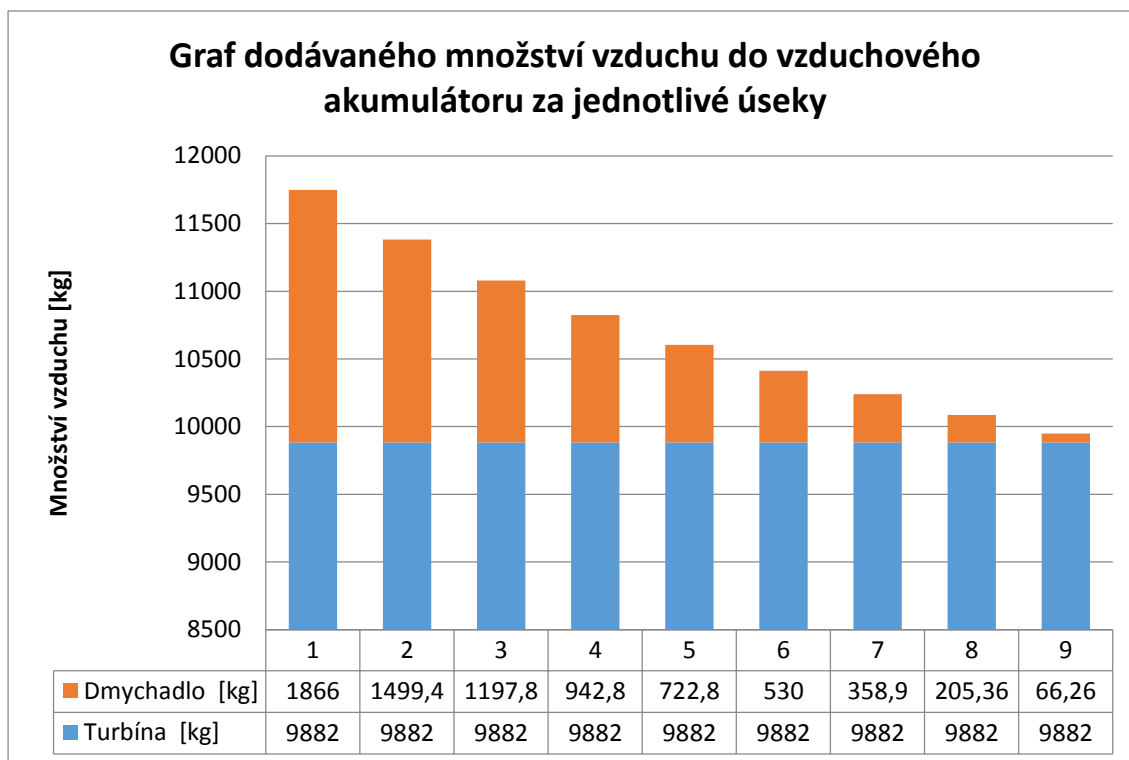
Tabulka 4.4 - dodané množství vzduchu dmychadlem do vzduchového akumulátoru

	Množství vzduchu za úsek [kg]
1	1866
2	1499,4
3	1197,8
4	942,8
5	722,8
6	530
7	358,9
8	205,36
9	66,26
Celkově za nabíjecí cyklus dodá dmychadlo 7388,92 kg	

Pomocí nasávaného množství vzduchu za úsek lze sestavit tabulku, která znázorní celkové množství dopraveného do vzduchového akumulátoru celým turbodmychadlem (tabulka 4.5), k tabulce patří obrázek grafu 4.9.

Tabulka 4.5 - dodávané množství vzduchu do vzduchového akumulátoru

	Množství vzduchu turbínou [kg]	Množství vzduchu dmychadlem [kg]	Celkem turbodmychadlo [kg]
1	9 882	1 866	11 748
2	9 882	1 499,4	11 381,4
3	9 882	1 197,8	11 079,8
4	9 882	942,8	10 824,8
5	9 882	722,8	10 604,8
6	9 882	530	10 412
7	9 882	358,9	10 240,9
8	9 882	205,36	10 087,36
9	9 882	66,26	9 948,26
suma	88 938	7 389,32	96 327,32



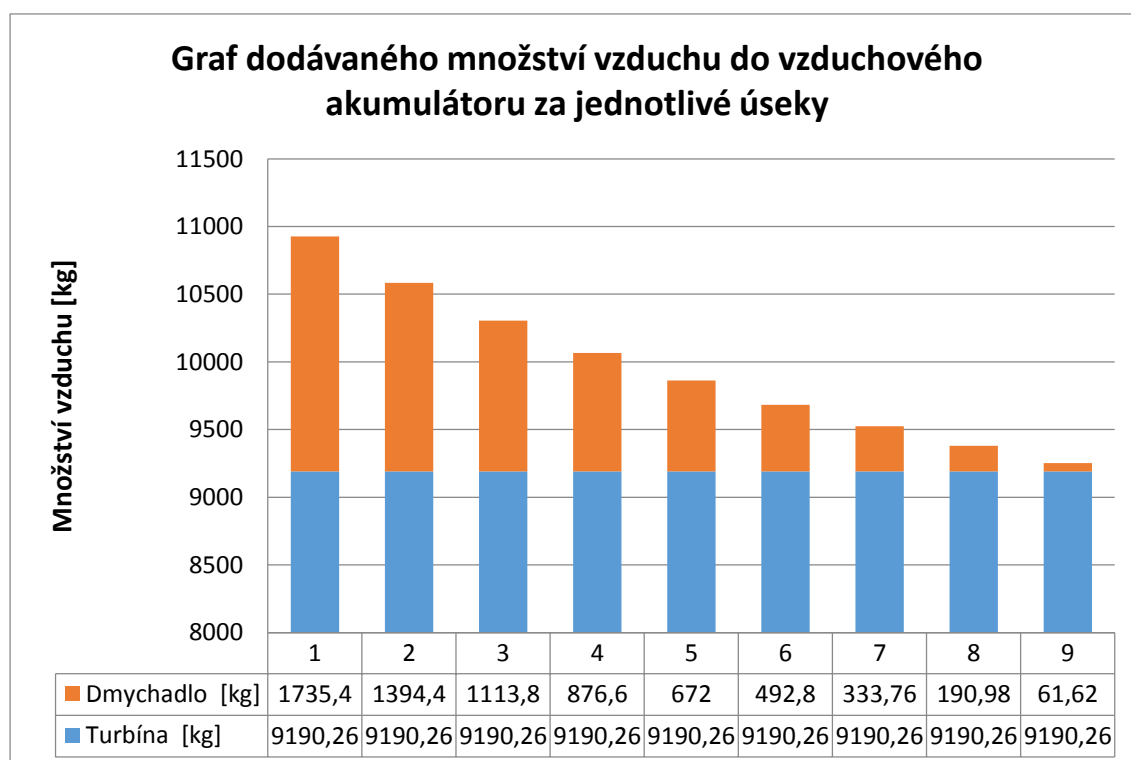
Obrázek 4.9 – graf dodávaného množství vzduchu do vzduchového akumulátoru za jednotlivé úseky

Celkové množství nasátého vzduchu dmychadlem odpovídá 8,3 % objemu vzduchu, který je potřeba dostat do vzduchového akumulátoru. Pokud se přičte i množství vzduchu, které přijde do vzduchového akumulátoru přes turbínu dmychadla, zjistí se, že do vzduchového akumulátoru bylo dopraveno 96 327 kg vzduchu namísto potřebných 88 938 kg. Proto byl proveden přepočít v analytickém modelu turbodmychadla, kdy se snížilo nasávané množství o 8% v nabíjecím kompresoru, jenže po této změně nasávaného množství se do vzduchového akumulátoru nedostalo požadované množství vzduchu, tudíž by hrozilo, že se nedosáhne tlaku 40 bar v akumulátoru. Proto bylo množství nasávaného vzduchu sníženo pouze o 7%, do vzduchového akumulátoru se díky této změně bylo dopraveno 89 583 kg vzduchu. Tím, že do akumulátoru se přivede o 500 kg více, se zvýší neznatelně konečný tlak akumulátoru. Snížit výkonnost zařízení o 7% se dá provést dvěma způsoby. První způsob, celé zařízení i s nabíjecím kompresorem, bude navrženo a postaveno na výkon o 7% nižší, díky této variantě se sníží pořizovací náklady na celé zařízení o milióny. Druhým způsobem je regulace nabíjecího kompresoru, tato varianta je nevýhodnější, protože by se muselo navrhnout a postavit zařízení o výkonu vyšším než je potřeba a pak by se tento výkon mařil pomocí regulace, ale byla by možnost v případě potřeby mít zařízení o vyšším výkonu. Investiční náklady by vzrostly v řádech desítek miliónu skrze instalaci větších zařízení a přidané regulace.

Snížení výkonu pomocí konstrukce a velikosti celého zařízení - první varianta snížení výkonu celého zařízení o 7% již při navrhování a konstruování. Tato varianta je mnohem ekonomičtější než regulace, protože výkon turbodmychadla a příkony nabíjecího kompresoru pohybujeme v řádech MW a zařízení na regulaci by stála desítky milionů. Pokud se podíváme jen na zařízení pro udržování konstantního tlaku vzduchu (turbodmychadlo), tento projekt má smysl, protože je možno postavit nabíjecí kompresor s příkonem o 7% menším a tím pádem ušetřit peníze na samotném zařízení, ale také na provozu.

Tabulka 4.6 - přepočítané dodávané množství vzduchu turbodmychadlem o 7%

	Množství vzduchu turbínou [kg]	Množství vzduchu dmychadlem [kg]	Celkem turbodmychadlo [kg]
1	9 190,26	1 735,4	10 925,66
2	9 190,26	1 394,4	10 584,66
3	9 190,26	1 113,8	10 304,06
4	9 190,26	876,6	10 066,86
5	9 190,26	672	9 862,26
6	9 190,26	492,8	9 683,06
7	9 190,26	333,76	9 524,02
8	9 190,26	190,98	9 381,24
9	9 190,26	61,62	9 251,88
suma	82 712,34	6 871,36	89 583,7



Obrázek 4.10 – graf dodávaného množství vzduchu do vzduchového akumulátoru o 7% na základě konstrukce zařízení

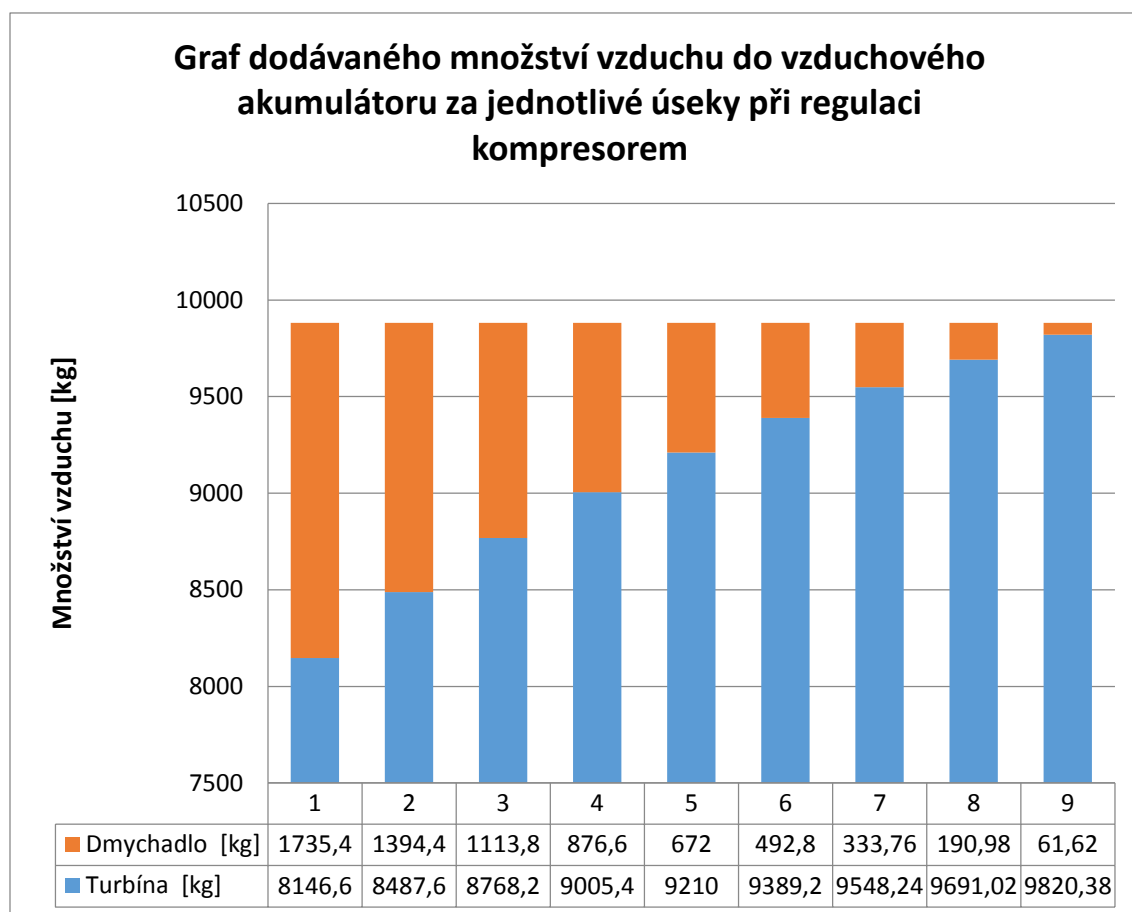
Snížení výkonu pomocí regulace nabíjecího kompresoru - v případě, když se zvolí snížení výkonnosti pomocí regulace, jsou k dispozici dva různé provozní stavy nabíjení. V obou případech zde umístěn nabíjecí kompresor, který bude schopen výkonnosti 24,705 kg/s. Na něm bude instalováno zařízení, které bude regulovat nasávané množství (škrcení na sání, frekvenčním měničem atd.). Nevýhodou regulace je pořizovací cena zařízení pro regulaci.

První situace jak lze provozovat nabíjecí kompresor s regulací. Výkonnost nabíjecího kompresoru snížíme o 7% pomocí škrcení na sání po celou dobu nabíjení, tím dosáhneme stejného provozu jako v tabulce 4.6. Výhodou takového provozu je rezerva ve výkonnosti, kdyby bylo potřeba nabíjet kratší dobu, nebo kdyby turbodmychadlo bylo mimo provoz, tak je nabíjecí kompresor schopen sám dostat požadované množství vzduchu do vzduchového akumulátoru sám za jednu hodinu. Nevýhodou takové provozu je pořizovací cena a do vzduchového akumulátoru se dostane opět více vzduchu, než je požadováno.

Druhá situace jak lze provozovat nabíjecí kompresor s plynulou regulací. Výkonnost nabíjecího kompresoru se bude regulovat pomocí frekvenčního měniče. Nabíjecí kompresor bude během provozu měnit nasávané množství vzduchu na základě nasávaného množství vzduchu dmychadlem u turbodmychadla. Na začátku nabíjecího cyklu, kdy dmychadlo dodává nejvíce vzduchu, bude výkonnost nabíjecího kompresoru snížena o požadované množství a čím více bude vzduchu ve vzduchovém akumulátoru, tím se bude zvyšovat výkonnost kompresoru, aby dorovnal rozdíl. Výhodou tohoto provozu je, že do vzduchového akumulátoru dostaneme přesně požadované množství vzduchu. Nevýhodou je zase pořizovací cena zařízení.

Tabulka 4.7 - přepočítané dodávané množství vzduchu turbodmychadlem o 7%

	Množství vzduchu turbínou [kg]	Množství vzduchu dmychadlem [kg]	Celkem turbodmychadlo [kg]
1	8 146,6	1 735,4	9 882
2	8 487,6	1 394,4	9 882
3	8 768,2	1 113,8	9 882
4	9 005,4	876,6	9 882
5	9 210	672	9 882
6	9 389,2	492,8	9 882
7	9 548,24	333,76	9 882
8	9 691,02	190,98	9 882
9	9 820,38	61,62	9 882
suma	82 066,6	6 871,36	88 938



Obrázek 4.11 – graf dodávaného množství vzduchu do vzduchového akumulátoru pomocí regulace kompresoru

4.6 Provoz tlakového zařízení pro jiný čas

Analytický model zařízení pro udržování konstantního tlaku vzduchu na výstupu mezi nabíjecím kompresorem a vzduchovým akumulátorem je navržen a vypočítán na dobu nabíjení vzduchového akumulátoru na jednu hodinu. Jedním z úkolů diplomové práce byla analýza provozu na jiný čas než jedna hodina. Analýza na jiné provozní časy je provedena na 30 minut, 2 a 3 hodiny. Pro přepočty byl použit analytický model s nasávaným množstvím vzduchu 24,705 kg/s.

Nabíjení vzduchového akumulátoru za jednu hodinu (původní) - původní nabíjecí doba vzduchového akumulátoru je zde uvedena pro porovnání s jinými dobami. Původní hodnoty v analytickém modelu jsou k dispozici v tabulce 4.8. Změna nabíjecí doby se mění pomocí nasávaného množství vzduchu (m) u nabíjecího kompresoru v závislosti na nasávaném množství vzduchu se mění příkon kompresoru, výkonnost turbíny turbodmychadla a tím i výkonnost dmychadla u turbodmychadla v nasávaném a dopravném množství vzduchu (m_d) do vzduchového akumulátoru. Teplota vzduchu se při změně nasávaného množství nemění. Při nasávaném množství vzduchu (m) 24,705 kg/s má nabíjecí kompresor příkon 14,2 MW. Turbodmychadlo musí dosahovat výkonu 1 912 MW (nejvyššího výkonu při nabíjení).

Tabulka 4.8 - původní doba nabíjení

Původní jedna hodina			
	Tlak v akumulátoru [bar]	Výkon turbodmychadla [kW]	Nasávané množství vzduchu dmychadlem [kg/s]
1	16,38	1 912	5,17
2	19	1 626	4,16
3	21,63	1 368	3,34
4	24,25	1 131	2,65
5	26,88	911,3	2,06
6	29,5	706,9	1,55
7	32,13	515,1	1,1
8	34,75	334,2	0,7
9	37,38	162,9	0,33
10	40	0,000001019	2,02E-09

Nabíjení vzduchového akumulátoru půl hodiny (30 minut) - jednou z variant jak změnit dobu nabíjení vzduchového akumulátoru je snížení doby nabíjení z jedné hodiny na 30 minut. Tento způsob změny doby nabíjení není výhodný, protože nasávané množství vzduchu v nabíjecím kompresoru se musí zvýšit dvojnásobně na 49,41 kg/s, což by vyžadovalo dvojnásobný příkon 24,4 MW. Stejně velké změny by se projevíly, také u zařízení pro udržování konstantního tlaku vzduchu na výstupu z kompresoru. Turbína i dmychadlo u turbodmychadla by muselo být navrženo a postaveno na dvojnásobnou výkonnost. Nevýhodou této varianty jsou mnohem vyšší investiční náklady na instalaci a provoz zařízení.

Tabulka 4.9 - kratší doba nabíjení (30 minut)

Kratší doba nabíjení			
	Tlak v akumulátoru [bar]	Výkon turbodmychadla [kW]	Nasávané množství vzduchu dmychadlem [kg/s]
1	16,38	3 824	10,34
2	19	3 252	8,32
3	21,63	2 736	6,68
4	24,25	2 262	5,3
5	26,88	1 822,6	4,13
6	29,5	1 413,8	3,1
7	32,13	1 030,2	2,2
8	34,75	668,4	1,4
9	37,38	325,8	0,66
10	40	0,000002038	4,04E-09

Nabíjení vzduchového akumulátoru za dvě hodiny (120 minut) - další varianta jak změnit dobu nabíjení, je ji prodloužit. Vzhledem k tomu, že zařízení bude především provozováno v nočních hodinách, kdy je elektrické energie přebytek (levnější elektrická energie). Změna doby je možná dvojitým způsobem. Buď to navrhnout a instalovat celé zařízení o nižší výkonnosti, nebo přidat na původní zařízení regulaci (frekvenční měnič, škrcení...), kdyby bylo instalováno původní zařízení s regulací dosáhlo by se mnohonásobně vyšších investičních nákladů. Pokud by bylo instalováno zařízení o nižší výkonnosti dosáhli bychom mnohem nižších investičních nákladů. Potřeba nasávaného množství klesá zde dvounásobně na 12,36 kg/s, tudíž i klesá příkon kompresoru na 7,1 MW a turbodmychadlo by pracovalo s menšími toky vzduchu. Druhá varianta nechat celé zařízení na původních hodnotách a nainstalovat regulaci nabíjecího kompresoru, investiční náklady budou vyšší, ale díky instalaci regulace dostaneme flexibilní zařízení, které se dokáže přizpůsobit aktuální situaci na trhu s elektrickou energií.

Tabulka 4.10 - delší doba nabíjení (120 minut)

Delší doba nabíjení dvě hodiny			
	Tlak v akumulátoru [bar]	Výkon turbodmychadla [kW]	Nasávané množství vzduchu dmychadlem [kg/s]
1	16,38	956	2,59
2	19	813	2,08
3	21,63	684	1,67
4	24,25	565,5	1,33
5	26,88	455,65	1,03
6	29,5	353,45	0,76
7	32,13	257,55	0,55
8	34,75	167,1	0,35
9	37,38	81,45	0,17
10	40	5,095E-07	1,0105E-09

Nabíjení vzduchového akumulátoru za tři hodiny (180 minut) - tato varianta nabíjení má stejné výhody, jako nabíjení dvou hodinové. Jen se změnou, že vzduchový akumulátor se nabíjí tři hodiny. Nasávané množství v tomto případě klesá trojnásobně na 8,24 kg/s a příkon nabíjecího kompresoru bude pouze 4,7 MW. Varianta nabíjení vzduchového akumulátoru po dobu 3 hodin vychází z hlediska investice nejlépe.

Tabulka 4.11 - delší doba nabíjení (180 minut)

Delší doba nabíjení tři hodiny			
	Tlak v akumulátoru [bar]	Výkon turbodmychadla [kW]	Nasávané množství vzduchu dmychadlem [kg/s]
1	16,38	637,33	1,72
2	19	542	1,39
3	21,63	456	1,11
4	24,25	377	0,88
5	26,88	303,77	0,69
6	29,5	235,63	0,52
7	32,13	171,7	0,37
8	34,75	111,4	0,23
9	37,38	54,3	0,11
10	40	0	0

4.7 Řízení a regulace celého zařízení akumulace

V této kapitole je popsáno řízení a regulace celého zařízení pro akumulaci. Pro lepší pochopení je vypracováno P/I schéma (výkres č. 3). Zařízení bude vybaveno přístroji pro indikaci, signalizaci, archivaci a zápis dat (tlaku, teploty a množství dopravovaného vzduchu). Pro řízení a regulaci celého zařízení pro akumulaci vzduchu budou instalovány regulátory průtoku množství vzduchu, tlaku a teploty. Jednotlivé přístroje pro regulaci a řízení jsou zakresleny ve výkresu P/I schéma, kde můžeme vidět jejich rozmístění v zařízení pro udržování konstantního tlaku vzduchu mezi nabíjecím kompresorem a vzduchovým akumulátorem.

Pro tlakovou redukci a využití tlakového spádu mezi nabíjecím kompresorem a vzduchovým akumulátorem je použito vysokootáčkové turbodmychadlo. Nasávaný vzduch z nabíjecího kompresoru prochází přes turbínovou část turbodmychadla do vzduchového akumulátoru. Na začátku nabíjení, kdy ve vzduchovém akumulátoru 16,38 bar turbodmychadlo dodává maximální možné otáčky, stejné otáčky má také dmychadlo turbokompresoru, které je spojeno s turbínou pomocí hřídele. V tomto okamžiku je do vzduchového akumulátoru dodáváno maximální množství vzduchu, díky vysokému tlakovému rozdílu mezi nabíjecím kompresorem a vzduchovým akumulátorem.

V průběhu nabíjení vzduchového akumulátoru se výkon turbodmychadla snižuje, protože klesá tlakový rozdíl mezi vzduchovým akumulátorem a nabíjecím kompresorem. Ke konci nabíjení vzduchového akumulátoru, kdy se tlak přibližuje k požadovaným 40 bar, se dmychadlo téměř zastaví, díky malému tlakovému spádu. Zařízení musí být vybaveno obtokem turbodmychadla. Pokud bude turbodmychadlo dobře navrženo, obtok bude využíván pouze při prvotním najetí zařízení (njetí ve vzduchovém akumulátoru z 1 bar). Pokud, ale turbína nebude navržena dobře, bude se obtok využívat při každém nabíjení a to v okamžiku, kdy bude tlakový spád mezi nabíjecím kompresorem a vzduchovým akumulátorem tak malý, že turbodmychadlo nebude schopno dodávat vzduch. V tomto případě se zavře ventil (V11) před turbodmychadlem a otevře se ventil obtoku (V12), tím dojde k odstavení turbodmychadla a požadovaný zbytek vzduchu dotlačí nabíjecí kompresor přes obtok.

Teplota vzduchu v zařízení je regulována výměníky vzduchu (vzduch-voda) pro vyšší účinnosti. Do výměníku je přiváděna voda z části pro akumulaci horké vody, kdy teplo ze vzduchu je předáváno vodě, která pak jde do horkovodního akumulátoru, kde chceme dosáhnout teploty vody 250 °C. Výměníky tepla jsou umístěny v nabíjecím kompresoru za každým stupněm, kdy první dva výměníky vychlazují vzduch na 80 °C,

a výměník na výstupu z kompresoru vychlazuje vzduch na 150 °C. Další dva výměníky (vzduch-voda) jsou v dmychadle u turbodmychadla. Zde se výměníky nacházejí za prvními dvěma stupni a vychlazují vzduch na 35 °C. Teplota vzduchu přiváděného do vzduchového akumulátoru je regulována výměníkem, který je opět připojen na systém s horkovodním akumulátorem. Teplotu před vzduchovým akumulátorem regulujeme, aby se vzduch za turbodmychadlem ochladil na požadovanou teplotu a byl tak zajištěn objem vzduchového akumulátoru. Kdyby teplota vzduchu v akumulátoru byla příliš vysoká, mělo by to za následek, že do vzduchového akumulátoru se nevejde požadované množství vzduchu, tím pádem by byla menší účinnost zařízení.

5. Závěr

Cílem této práce bylo vytvoření analytického modelu pro udržování konstantního tlaku vzduchu mezi nabíjecím kompresorem a vzduchovým akumulátorem v systému pro akumulaci elektrické energie EC CAES.

V první polovině diplomové práce je vypracována rešerše na téma akumulace energie. V této části jsou obecně vysvětleny principy a důvody akumulace. Rešerše obsahuje také rozdělení akumulace energie podle využití a technologie. Dále se zde nachází popis funkce systému akumulace EC CAES pro využití s klasickým energetickým zdrojem, horkovodním kotlem nebo parním kotlem a parní turbínou.

V úvodu praktické části diplomové práce můžeme vidět napsanou definici a princip činnosti zařízení pro udržování konstantního tlaku vzduchu mezi nabíjecím kompresorem a vzduchovým akumulátorem. Dále v praktické části nalezneme vypracované analytické modely. Jednotlivé modely jsou rozepsány v práci, jakým způsobem se počítali v programu EES a důvody jejich řešení. Analytické modely byly v diplomové práci řešeny jako idealizované stroje.

Analytický model nabíjecího kompresoru je řešen, abychom dostali orientační příkon kompresoru. Na základě výpočtů bylo zjištěno, že nabíjecí kompresor bude mít při nasávaném množství vzduchu (\dot{m}) 24,705 kg/s příkon 14,1 MW.

Analytický model turbodmychadla, nebo-li zařízení pro udržování tlaku vzduchu mezi nabíjecím kompresorem a vzduchovým akumulátorem. Jeho vypracování bylo hlavním úkolem diplomové práce. V práci je turbodmychadlo rozděleno na dva samostatné analytické modely, kde turbína je řešena pro zjištění výkonu, který bude dodávat dmychadlu. Při dopravovaném množství vzduchu (\dot{m}) 24,705 kg/s přes turbínu u turbodmychadla, bude turbína dodávat dmychadlu u turbodmychadla maximální výkon 1,9 MW. Dmychadlo na základě dodaného výkonu od turbíny nasává vzduch z okolí (\dot{m}_d) 5,171 kg/s, při výkonu 1,9 MW. Pomocí nasávaného množství vzduchu (\dot{m}_d) se dopočetlo celkové dopravené množství vzduchu do vzduchového akumulátoru za jedno nabíjení. Dmychadlo bylo schopno dopravit za jednu hodinu nabíjení 7388 kg. Pomocí výsledků analytických modelů se spočítalo, že zařízení pro udržování tlaku vzduchu dokáže ušetřit 7% výkonu celého zařízení.

Po přepočítání modelů o 7% jsme dostali tyto hodnoty. Nasávané množství vzduchu u nabíjecího kompresoru se zmenšilo z 24,705 kg/s na 22,98 kg/s, tudíž se i zmenšil příkon na 13,2 MW. Maximální požadovaný výkon turbodmychadla také klesl a po přepočtu potřebujeme turbodmychadlo o výkonu 1,8 MW. Pokud se podíváme

na těch 7% úspory, můžeme říct, že projekt zařízení pro udržování konstantního tlaku mezi nabíjecím kompresorem a vzduchovým akumulátorem má smysl, protože se jedná o zařízení ve výkonech megawatt a investiční náklady se zde počítají v desítkách miliónů. Tudíž každá úspora energie se projeví v investovaných nákladech na zařízení v miliónech.

V závěru praktické části diplomové práce můžeme vidět popsany způsob řízení celého zařízení pro akumulaci vzduchu spolu se P/I schématem.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat mému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Ladislavu Viliřmcovi a panu Ing. Jaroslavu Konvičkovi Ph.D. za spolupráci, trpělivost a čas, který mi při řešení této diplomové práce věnovali.

6. Seznam použité literatury

[1] DOC. ING. VILIMEC, Ladislav a Jaroslav ING. KONVIČKA. EC CAES - AKUMULACE ELEKTŘINY U DECENTRÁLNÍCH ENERGETICKÝCH CENTRÁL.

[2] Akumulace energie [online]. [cit. 2017-12-29]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/akumulace-elektricke-energie--9696>

[3] HUŠEK, Josef. Přečerpávací vodní elektrárny. Vyd. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1963, 320 s.

[4] BUDÍN, Jan. Technologický plán akumulace energie (elektrické a tepelné) [online]. 6. května 2017 [cit. 2017-12-29]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/technologicky-plan-v-oblasti-akumulace-energie/>

[5] Přečerpávací elektrárna Dlouhé stráně [online]. In.: [cit. 2017-12-29]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz>

[6] ZAJAC, Jaromír. Jak uložit energii. Magazín 3Pól [online]. [cit. 2018-02-18]. Dostupné z: <http://3pol.cz/470-jak-ulozit-energii>

[7] *Dejvice.cz: Energetické mýty* [online]. [cit. 2018-02-18]. Dostupné z: http://www.dejvice.cz/edison/energeticke_myty.html

[8] BAČA P., DVOŘÁK P.: Akumulace elektřiny [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/7435-akumulace-elektriny>

[9] REICHL T.: Průtoková baterie [online]. [cit. 2018-02-20]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/prutokova-baterie/>

[10] VOBŮŘIL D.: Přečerpávací elektrárny v ČR [online]. [cit. 2018-02-20]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrarny-cr/precerpavaci-vodni-elektrarny-v-ceske-republice/>

[11] ESPC Inc., 150, 300, 400 MW CAES Plants Based on Various Combustion Turbines [online], Dostupné z: http://www.espcinc.com/library/150-300-400_MW_CAES_Brochure.pdf

[12] COMPRESSED AIR ENERGY STORAGE: *Compressed Air Energy Storage (CAES)* [online]. [cit. 2018-02-27]. Dostupné z: <http://energystorage.org/compressed-air-energy-storage-caes>

[13] ING. KABEŠ, Karel. Adiabatická tlakovzdušná akumulární elektrárna. *ELEKTRO časopis pro elektrotechniku* [online]. 2011, , 2 [cit. 2018-03-02]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/adiabaticka-tlakovzduzna-akumulacni-elektrarna--9983>

[14] EnergyStorageAssociation, Isothermal CAES [online], [cit. 2018-03-02]. Dostupné z: <http://energystorage.org/energy-storage/technologies/isothermal-caes>

[15] DOC. ING. VILIMEC, Ladislav a ING. VILIMEC KONVIČKA PH.D. Podnikatelský záměr projektu: Výzkum decentrálního energetického kogeneračního zdroje s akumulací elektřiny.

7. Seznam příloh

Výkres č. 1 - schéma zapojení systému akumulace

Výkres č. 2 - schéma zapojení a armatur

Výkres č. 3 – P/I schéma

Model č. 1 – analytický model nabíjecího kompresoru

Model č. 2 - analytický model turbíny u turbodmychadla

Model č. 3 - analytický model turbodmychadla